S4-1-4　スーパーメトロ　－　減圧超高速鉄道の可能性

［土］　小長井　一男（東大生研）、　［土］○佐藤　吉彦（軌道システム）、　［機］　前田　達夫（鉄道総研）、　［機］　斉藤　実俊（鉄道総研）、　［土］　佐藤　貴史（運輸政策研）

SUPERMETRO – Feasibility study on depressed high speed railway

Kazuo Konagai (Institute of Industrial Science), Yoshihiko Sato (Railway Track System Institute),
Tatsuo Maeda (Railway Technical Research Institute –RTRI), Sanetoshi Saito (RTRI),
Takashi Sato (Institution for Transport Policy Studies)

Since the air resistance of high speed railway increases rapidly with speed, especially in tunnel, the railway in vacuum even with use of gravity is proposed in USA in about 1965 and the development of it was initiated in Switzerland in about 1980 as "Swissmetro". The application of it to Japan was investigated in the study group set in Japan Society for Civil Engineer in 2004. As a result, this system could be realized in 0.5atm which corresponds to that as of Himalaya, but not in 0.1atm which has been considered to be necessary for the system so far. It suggests that this system could be realized with technologies in hands.

キーワード：超高速鉄道、減圧トンネル、空気抵抗、トンネル断面積比、
Keywords: super-high speed railway, depressed tunnel, air resistance, car/tunnel section ratio

1．はじめに

在来方式の鉄道においてはスペインのマドリッドーフランス国境線そしてフランスのTGV東線で350km/h運転が、日本では東北新幹線の新青森開業で360km/h運転が計画され、浮上式鉄道においては上海で430km/h運転が実現され、日本では500km/h運転が目標とされている。

このように高速となるに従い、トンネル内の空気抵抗さらには温度上昇が加速度的に大きくなり、これを緩和するためには車両断面積とトンネル断面積の比で表されるトンネル断面積比Rを小さく取る、つまり車両断面に対するトンネル断面を大きく取る必要があり、物理的にまた経済的に大きな問題となってくる。この問題を解決するために、トンネル内の空気を抜いて亜真空とすることが考えられ、さらにこのトンネルに勾配を設け重力を利用して加減速する真空重力鉄道の構想が、1965年頃にアメリカで提案され[1)-3)]注目を浴びた。

このアイデアはその後1980年頃スイスで取り上げられ、スイスメトロの計画として推進母体となるスイスメトロ社が設立され、ローザンヌ工科大学が中心となり現在までに1734.5万CHF（15億6000万円、1CHF=90円で計算）がその開発に投じられ、さらに成功すれば以後2年間に400万CHF(3億6000万円)が投じられることとなっている。この計画は地下50mに直径5mの単線トンネル2本を掘り、0.1気圧に減圧し、400名程度の列車を磁気浮上リニアモータ駆動により500km/hで走行させ、スイスの主要な都市を1時間で結び、将来はユーロメトロとしてリヨンーウィーン間を2時間15分で結ぶというもので、試験線の試験を15年後までに行い、20年後に先行線の営業を開始しようというものである[4)]。

昨2004年、このようなシステムの日本への適用に関して、土木学会構造工学委員会鉄道構造小委員会の中に「減圧トンネルを含む新形式高速鉄道」研究会（主査小長井一男東大教授）を設けて精査し、都心ー国際空港程度の距離にこれを適用する場合を念頭に新たなシステムの可能性について検討行った[5),6)]。

2．限界トンネル断面積比の検討

トンネル断面比Rは、前記の様々の条件の下で、山梨実験線では図1[7)]の0.12、山陽新幹線では図2[8)]の0.22とされているが、ここでは減圧によりこのトンネル断面積比を大きくすることが可能であると考えられるので、まずこの物理的な上限R_cについて検討する。

まず車両限界を現在の山梨実験線における車両断面をベースに3（幅）×3.5（高）mとした。建築限界に関しては、山梨実験線では空力ブレーキを考えて大きく取られているが減圧トンネルでは、空気抵抗が低減されるため、考慮しない。車両間隔については、ガイドウェイ幅が0.5mなので、トンネルを円形として作図をすると図3となり、半径4.2mの円形トンネルが限界となる。円形トンネル断面積からインバートおよびガイドウェイ断面積を差し引くと、トンネル断面積は35.1m^2，車両断面積が8.9m^{2}で実現可能な限界トンネル断面比R_cは0.25となる。

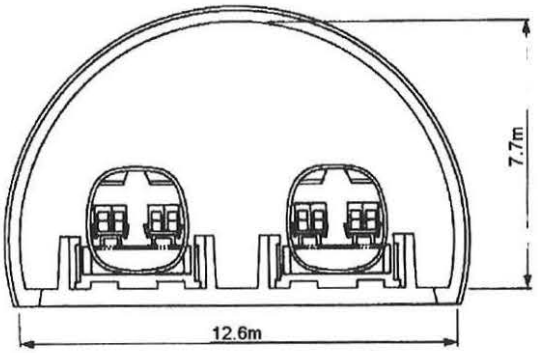


図1 山梨実験線 (R=0.12)

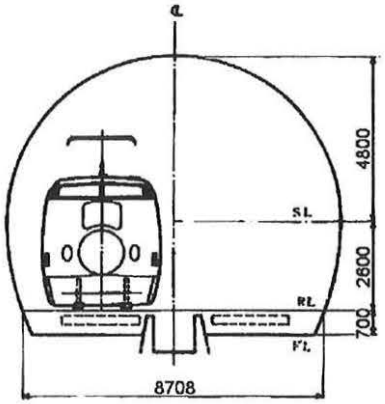


図2 山陽新幹線 (R=0.22)

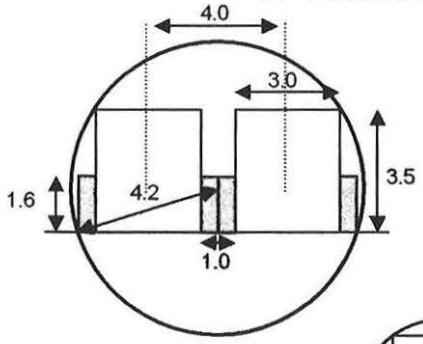


図 3 複線トンネル
(R_c=0.25)

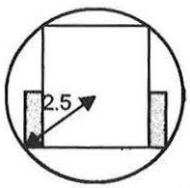
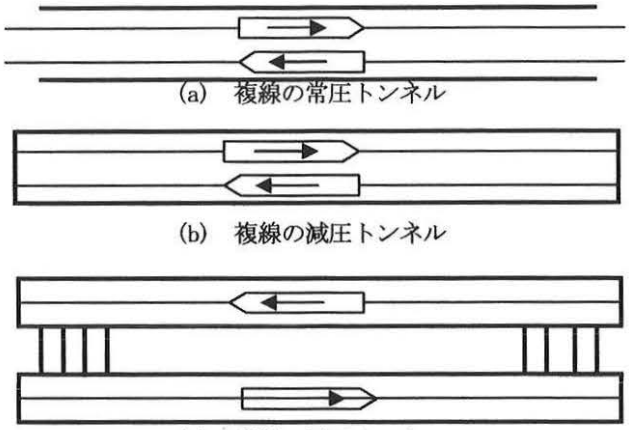


図 4 単線トンネル
(R_c=0.59)

単線トンネルの場合には図4のようになり、トンネル断面積からインバートならびにガイドウェイ断面積を差し引くと 15.2m² となり、これに上記の車両断面積を考えると限界トンネル断面積比 R_c は 0.59 となる。

3．減圧下の空気抵抗に関する数値計算[5)]

この計算はトンネル内の流れを非定常1次元流れ[注1)]として取り扱うもので、発生する圧力波の影響についても考慮しているが、空気の圧縮性は考慮していない。計算を行ったのは、図5に示す基本となる両端開放の通常タイプの複線トンネルと両端閉鎖の減圧トンネル（複線、単線）の3種類で、単線のトンネルには上下線を繋ぐ連絡坑が両端部から 100m と 5km の2箇所づつ、合計4箇所存在する。



(a) 複線の常圧トンネル

(b) 複線の減圧トンネル

(c) 単線の減圧トンネル

図5 計算を行ったケース

表1 計算主要パラメータ

	列車	トンネル	連絡坑
断面積(m²)	8.9	*	12.56
水力直径[注2)](m)	3.04	*	4.0
長さ(m)	350	57000	30
水力的摩擦係数	0.013	0.020	0.020
圧力抵抗係数	0.2		

*断面積比 R から決定

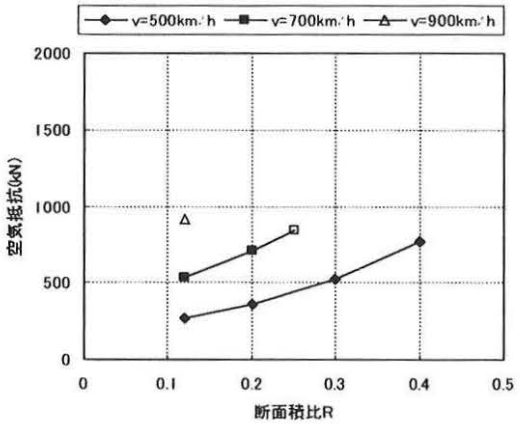


図6 通常トンネルにおける空気抵抗

このパラメータを示したのが表1である。

計算結果は次の通りである。

(1) 通常トンネル

通常トンネルにおける空気抵抗を示したのが図6である。空気抵抗は圧力波の影響で非定常なので、平均値を示している。図中白抜きは列車とトンネル内の流れが局所的に音

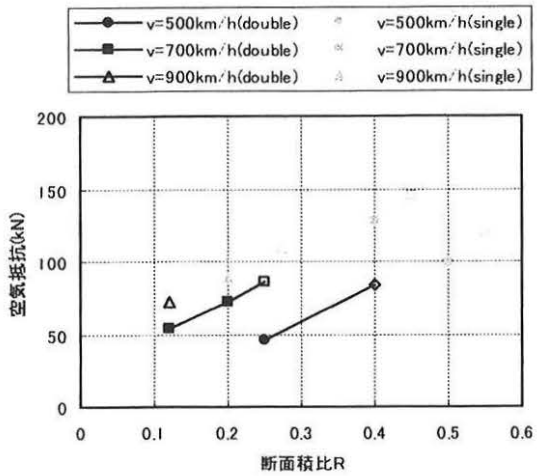


図7　減圧トンネル（0.1atm）における空気抵抗

速にほぼ等しくなる条件を示しており、シミュレーションの適用限界を示している。

同じ断面積比 R では、速度の2乗に比例している。

(2) 減圧複線トンネルと減圧単線並行トンネル

0.1気圧に減圧した場合の空気抵抗を示したのが図7である。これから空気抵抗は圧力に比例して1/10になっていること、2本の単線トンネルの断面積合計が複線トンネルと合致する条件、例えば700km/hの複線トンネル R=0.2における空気抵抗が73kNであるのに対して、単線トンネル R=0.4における空気抵抗は約128kNで、複線トンネルにおける空気抵抗は単線トンネルの約60%である。

(3) 考　察

トンネル内の流速と空気抵抗を制約条件として、実現可能なトンネル断面積比の限界値を求める。前者は音速（340m/s：10℃）を、後者は山梨実験線と同じ500km/h、R=0.12における空気抵抗計算値（267kN）を限界とした。

表2　複線トンネルにおける限界値

気圧 (atm)	列車速度 (km/h)	断面積比 R	空気抵抗 (kN)	列車との相対流速最大値 (m/s)
0.1	500	0.40	83.7	320.
	700	0.25	86.5	339.
	900	0.12	72.1	345.
0.5	500	0.25	231.	207.
	700	0.12	271.	241.

表3　単線トンネルにおける限界値

気圧 (atm)	列車速度 (km/h)	断面積比 R	空気抵抗 (kN)	列車との相対流速最大値 (m/s)
0.1	500	0.55	119.	321.
	700	0.45	145.	345.
	900	0.27	109.	342.
0.5	500	0.3	239.	202.
	700	0.12	254.	218.

この限界値に接近した値を示したのが表2および3の網掛けの部分である。0.1気圧ではトンネルの流速によって、0.5気圧では空気抵抗によって制限される。900km/hで走行する場合、0.1気圧の複線では R=0.12、単線では R=0.27程度までトンネルを大きくする必要があり、700km/hでは0.1気圧の複線で R=0.25、単線で R=0.45、0.5気圧の単複線とも0.12となり、500km/hでは、0.1気圧の複線で R=0.40、単線で R=0.55、0.5気圧でも R=0.25、単線で R=0.3程度までトンネルを小さくすることが可能となる。

4．実現可能な計画

以上に基づいて、実現可能と考えられる計画を検討したのが図8である。

すなわち、現在の山梨実験線1気圧 R=0.12の計画に較べ、当初0.5気圧で500km/h走行をすることを考えれば、複線では R=0.25、単線では R=0.3で可能であり、将来これを0.1

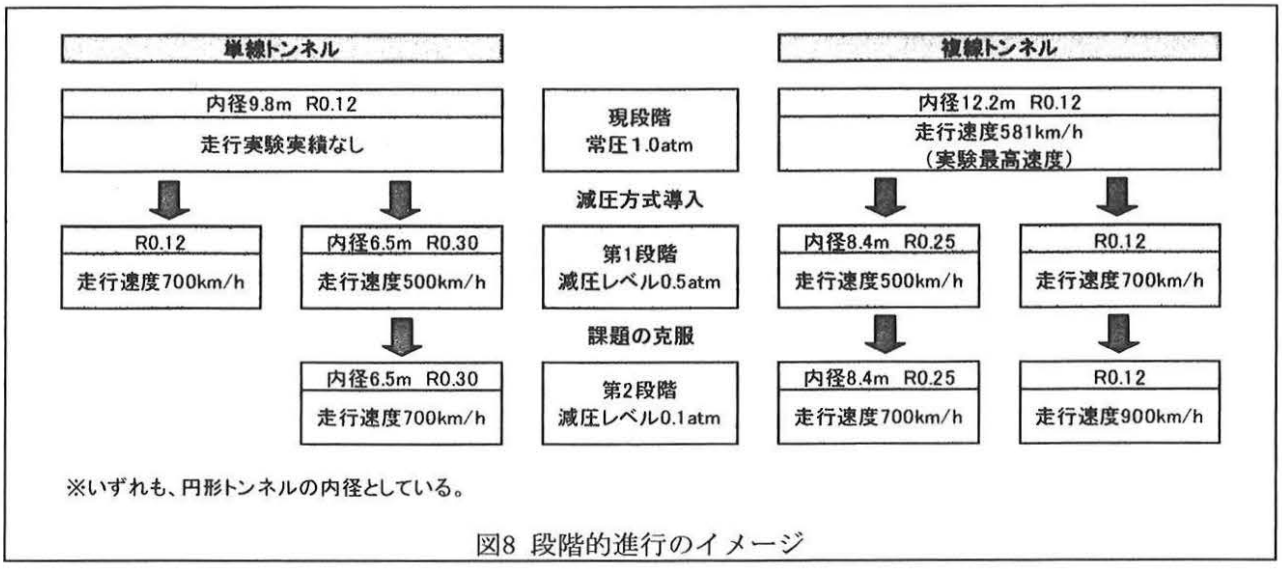


図8 段階的進行のイメージ

気圧に減圧すれば、700km/h 走行が可能となる。

複線トンネルで更なる高速化を目指す場合、R=0.12 としておけば、0.5 気圧で 700km/h、0.1 気圧とした時点では、900km/h 走行が可能となる。実際のトンネル断面積比は、将来の速度に加えて工事費、減圧費用、運行エネルギー費、保守費、環境負荷、車両製造費等トータル費用と社会便益を考えて、山梨の R=0.12 から限界トンネル断面積比の間で選択することになると考えられる。

トンネル工事費用に関しては、トンネルモデルを単純化し算定したところ、トンネルでは断面積にほぼ比例して減少した。減圧レベル、走行速度を同一にした場合、複線トンネルと単線トンネルに係る費用を比較すると、単線トンネルは連絡坑等を必要とすることから割高になるものと考えられる。単複いずれにしろ、常圧における場合に較べて約 60%程度の費用（第 1 章の区間に対しては数千億円オーダー）でトンネルの建設ができる可能性がある。0.1 気圧あるいは 0.5 気圧を維持するためのポンプの費用はトンネル工事費に較べれば遙かに小さい(数十億円オーダー)が、駅に関してはロック[注3)]等建設費用の増要素もあるので十分検討する必要がある。

図 7 に示すような段階的なプロジェクトの進行は、0.5 気圧から始めれば、万が一車両にダメージを生じた場合でも従来想定されてきた 0.1 気圧の場合に較べ、その安全性を大きく向上することが出来る。さらに、車内も航空機と同様ある程度減圧することとすれば内外の圧力差が小さくなり、さらに安全性が向上すると考えられる。

この運営に完熟した後に、将来逐次減圧を大きくすれば、減圧を維持するための費用は発生するが、同一動力で速度向上が可能となる。

諸外国は 0.1 気圧の単線 2 本のトンネルによる 500km/h の計画を提案し進めているのに対して、日本はすでに磁気浮上リニアモータ駆動で 581km/走行の実績を持ち、複線トンネル掘削に多くの経験を有していることから、これらに基づき諸外国とは異なる、当初 0.5 気圧の複線トンネルで 500km/h 走行とすることは十分可能であると考えられる。またこれにより常圧のトンネルに対してその建設費を大幅に削減でき、将来その気圧をさらに低下することにより同一設備で速度向上することを含め、多くのメリットが考えられる。また、このシステムは、大深度地下鉄により実現することにより騒音・振動から完全に解放され、環境に優しいシステムとしてこれを実現することが出来る。

この構想を「スーパーメトロ」として提案する次第である。

5．今後の課題

この計画の実現に際しては、多くの課題があるが、これらの大分類を挙げれば次のようになる。

トンネル緒元、減圧装置、車両、停車場、空気力学、安全、地質的条件，プロジェクトの進行

特に、早急にその検討を進める必要があるものとしては、人体に対する影響、駅と車両の構造（ロックを含む）、トンネルの機密性、空気力学的特性（圧縮流体として）がある。

運営費に関しては、推力を山梨実験線におけるものを基本としているが、これをどの程度のものとするかもトンネル断面積比と関連してライフ・サイクル・コスティングの立場から、今後の課題である。

6．むすび

この構想は、文献 5)の研究会においてその他の関係事項を含めて討議され、その結果として生み出されたものであるが、ここではこの構想に対して終始議論を進め、その成果に責任を担う方々を絞って発表者とした。

ご関心の方々は是非当該報告書をご覧頂きたい。

参考文献

1) 藤江恂治：“チューブ鉄道”鉄道線路 17-1(1969)。.
2) 超高速鉄道のガイドウェー方式」研究グループ：“超高速鉄道用ガイドウェイ研究のための文献調査、第 I 部総論、第 II 部各種計画そその背景”鉄道技術研究所速報 69-209 (1969)。
3) 超高速鉄道のガイドウェー方式」研究グループ：“超高速鉄道の研究 (4) 4．チューブ鉄道”鉄道線路 18-5 (1970)。
4) 佐藤吉彦：“スイスメトロ（減圧超高速鉄道）実現への道程”JREA47-11 (2004)。
5) 土木学会構造工学委員会鉄道構造小委員会「減圧トンネルを含む新形式高速鉄道」研究会：“減圧高速鉄道に関する基礎研究”報告書 (2005.03)。
6) 同上小委員会減圧高速鉄道研究会：“スーパーメトロー減圧高速鉄道の可能性”JREA48-8 (2005)。
7) 井出耕也：“疾走する超電導－リニア五五〇キロの軌跡”ワック㈱ (1998)
8) 山本彬也：”新幹線トンネルの圧力変動・空気抵抗・トンネル換気”鉄道技術研究報告 871 (1973) の図 1 を組合せて作製。

注

1) トンネルの断面内は一様とし、長さ方向だけの変化を考えた流れ
2) 列車を円筒として換算したときの直径
3) 常圧空間と減圧空間を結合するための装置