

## 2301 山梨リニア実験線新型車両の走行試験結果概要

### Summary of running test results of new vehicles for Yamanashi Maglev Test Line

〔機〕 ○菅沢 正浩 保坂 史郎 岩本 孝昌（東海旅客鉄道株式会社）

山本 克也 田川 直人（財団法人鉄道総合技術研究所）

Masahiro Sugesawa, Shiro Hosaka, Takamasa Iwamoto (Central Japan Railway Co.)  
Katsuya Yamamoto, Naoto Tagawa (Railway Technical Research Institute)

Six years have passed for the Yamanashi Maglev Test Line since the start of vehicle running tests in April 1997. During this period, the MLX01 train attained two world speed records. The cumulative distance covered by the trains reached 310,000 km. Vehicle running tests for reliability and durability have been performed, and two new vehicles, Mc5 and M4, have been constructed and introduced to the Yamanashi Maglev Test Line last summer, with attention to improvements in aerodynamics and noise. In this paper, summary of running test results of these new vehicles are described, focusing on the design view.

*Keywords:* Maglev vehicle, Aerodynamics, CFD, micro pressure wave, Noise

#### 1. はじめに

山梨リニア実験線では、1997年4月に走行試験を開始して以来、既に6年が経過した。その間に、有人最高速度552 km/h、すれ違い相対速度1003 km/hという二つの速度世界記録を樹立してきた。累積走行距離は2003年9月時点で31万kmを超え、試乗者数は5万7千人に達している。平成12年度末には旧運輸省の超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会において「実用化に向けた技術上のめどは立ったものと考えられる」との評価を受け、現在は信頼性・耐久性を確認するための走行を継続している。その一方、経済性、快適性及び空力特性の一層の向上を目指して2両の新型車両を新たに製作し、2002年7月から山梨実験線において走行試験を開始した。1両はMc5と呼ばれる先頭車であり、もう一両はM4と呼ばれる長尺中間車である。



Fig.1 Running test of new vehicles

これらの新型車両は走行開始から11日目にして設計最高速度の550 km/hに到達し、技術的な成熟度を示した。本論文では、これら新型車両の設計の考え方を踏まえ、走行試験結果を中心に紹介する。また、この本論文では、従来のMLX01車両と比較しながら微気圧波、空気振動、空気抵抗及び騒音の低減について述べる。

#### 2. 空力特性及び騒音改善の必要性

従来JRマグレブ車両の種々の走行試験結果から、次のような課題に対して改善が必要であるということが明らかになった。

##### <2.1> 微気圧波、空気振動

山梨実験線ではトンネル緩衝工の改良により微気圧波の発生は回避されているが、微気圧波は速度の3乗に比例して増大するため、緩衝工の長さは100mにも達する。また、マグレブ列車が500 km/hという超高速で走行する際に、空気振動現象が初めて観測された。この空気振動はマグレブ列車がトンネル又はトンネル緩衝工に突入する際に発生し、実験線近傍の家屋の窓やドアを揺らす。これらの現象を抑制し、システムコストを低減するためには、緩衝工と車両先頭形状の最適な組合せを見出す必要がある。

##### <2.2> 空気抵抗

JRマグレブシステムは車両とU字型ガイドウェイ間が比較的小さい隙間ではあるものの、列車の空気抵抗係数は新幹線よりも小さく、一人あたりの空気抵抗係数は新しい新幹線車両と同等であり、優れた特性を有している。しかし、JRマグレブは従来鉄道よりも走行速度が高いため、省エネルギーに向け一層の空気抵抗低減が必要である。

##### <2.3> 空力騒音、車内騒音

JRマグレブは環境アセスメントで決定された騒音環境基準を達成している。一方で、その騒音特性は先頭台車の先端エッジに空力騒音ピークがあることを示している。列車騒音を下げするためには、先頭台車の空力騒音を低減するのが不可避である。

また従来の中間車の車内騒音は、窓からの騒音透過が天井パネル、側パネル及び床パネルからよりも大きい。その主な周波数の範囲は質量則があまり有効でない160 Hz～500 Hzであり、更なる車内騒音低減には質量則によらない低減方策が必要である。

上述の理由によって、改善された空力特性及び優れた遮音性能をもつ新型車両を用いた試験が必要である。

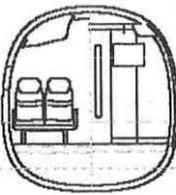
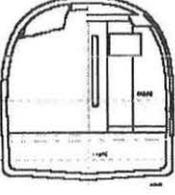
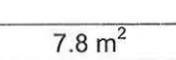
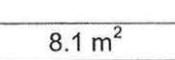
### 3. 空力特性及び騒音改善に向けた戦略と新型車両仕様

#### < 3. 1 > 空力特性

##### (1) 下部断面の角型化

従来車両は気密荷重にたえられるよう構造を優先したため、表1のような円形断面であった。このため、ガイドウェイ流管内での車体中間部と連接台車部との断面変化が大きかった。従来車両の試験結果で、この断面変化により台車ピッチで台車前方でのガイドウェイからの流出、台車後方でのガイドウェイへの流入、及び流速と乱れの増加が発生していることが判明した。これらの現象を抑制し空気抵抗を低減するため、表1に示すように一般断面の下部について、従来車両の円形断面に対して新型車両は角型化している。その結果、ガイドウェイ流管内での車体中間部と連接台車部との間の断面隙間の変化量は半減している。

Table1 Comparison of two cross sections

	Existing sub-round	New model Square shape
Shape of cross-section		
Truck part		
Area	7.8 m <sup>2</sup>	8.1 m <sup>2</sup>
Concept	Priority on structure for air-tight load	Priority on aerodynamic performance

##### (2) 先頭部の延長とVwall理論の適用

従来先頭形状の走行により得た知見は、次の通りである。

- 微気圧波、空気振動を抑制するためには、先頭部を延長するのが望ましい。
- 先頭形状最適化への指針がなく、従来先頭形状は必ずしも最適化されていなかった。
- 先端から先頭台車前端までの距離が短か過ぎ、断面の急激な変化によって先頭台車前端での急激な流速増加を招いていた。

これらの課題を考慮して、先端から先頭台車前端の間の距離を3.7mから6.4mに、先頭部の長さを9.1mから試験的にノーズ長さを可能な限り延長し、23mに拡大した。そして、先頭形状開発に初めてVwall理論を適用した(図2)。

Vwall理論とは、微気圧波を最小化するために発案された。まず、先頭形状の候補モデルを用いて、明かり区間における定常CFD解析を行う。次にこのCFD結果を使用して、トンネルやトンネル緩衝工の壁面と同じ位置の仮想壁面上での流速の壁面法線方向成分でVwall値を評価する。最後に、Vwall値の最大値を極小化するように多くの形状の中から最適先頭形状が決定される。更に、線形音響理論を援用することで、Vwall理論は空気振動の最小化に拡張される。このVwall理論の利点は、比較的計算量の少ない明かり区間の定常CFD解析のみを使用し、トンネル入口での微気圧波や空気振動のような非定

常現象について容易に設計指針が得られる点にある。

その結果、Mc5先頭形状のVwall最大値は、従来のMc1(ダブルカスプ)車両と比較して、約49%まで低減した。

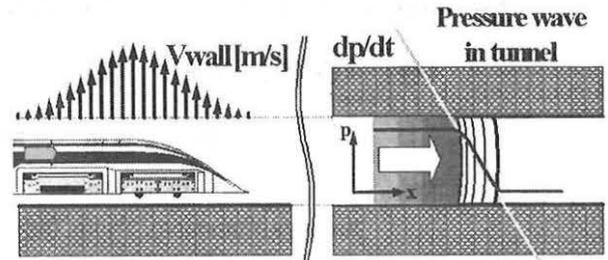


Fig. 2 Conceptual diagram of Vwall theory

#### < 3. 2 > 騒音

##### (1) 先頭台車前方の断面変化率緩和

空力騒音のピークは局所流速増加と局所不整によって発生する。これを抑制するため新型車両では前述の通り、下部断面の角型化とともに、車両先端から先頭台車までの距離を従来車両3.7mから6.4mに延長している。しかも先頭台車への流入流速増加を更に抑制するため、先頭台車前方に断面変化を緩やかにする可動スロープを設置することした。

##### (2) 理想的な二重窓構造

従来M3中間車の車内騒音で見られる質量則では対処し難い160Hz~500Hzのピーク発生原因を調査したところ、複層窓間の空気層がたった6mmしかないために、透過損失がこの周波数領域で小さくなることがわかった。従って、250Hz以上の周波数領域における透過損失を増大させるため、外側窓と内側窓の間の空気層を6mmから75mmに拡大した(図3)。

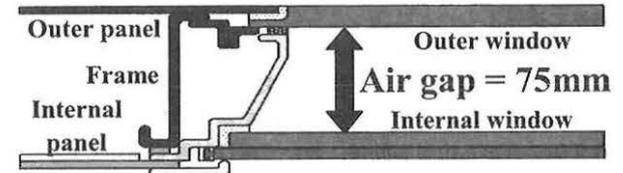


Fig.3 Window cross section with wide air gap

この二重窓の理想的な条件下において、図4に示す通りの車内騒音低減見込みを得た。更に、車内騒音は最終的には客室に面する内装板から放射されるため、車体構造振動に対して内装板を絶縁することを目的に、本格的なインシュレータを構体と内装パネル間に設置した。

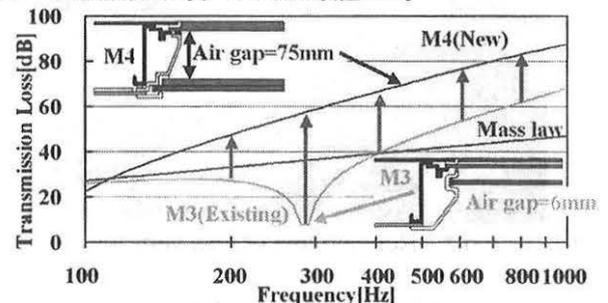


Fig.4 Calculated transmission loss of windows

#### < 3. 3 > 新型車両の仕様

上記2項目に基づき、2両の新型車両の仕様を表2のように定めて製作した。この2両は、2002年6月に山梨実験線に投入されて各種試験を実施している。

Table 2 Main specifications of the new vehicles

Car	Mc5 (MLX01-901)	M4 (MLX01-22)
Classification	Leading car Facing Kofu	Long intermediate car
Max speed	500 km/h (maximum test speed 550 km/h)	
Train set	3 cars / 4 cars	
Train set type	Superconducting magnet type, articulated truck	
Seat	Seat pitch:880 mm, Seat width:455 mm	
Capacity	16	68
Weight	32.0 t (loaded)	23.0 t (loaded)
Length	28,000 mm (nose: 23,000 mm)	24,300 mm
Width	Cabin : 2,900 mm, Truck : 3,150 mm	
Height	Wheel-supported running: 3,320 mm, Levitated running: 3,280 mm	
Air-tight load	Maximum : -20 to +13 kPa, Repeat : -17 to 11 kPa × 10 <sup>5</sup> times	
Facility	Crew cabin	Facility for test-ride, toilet

4. 空力特性改善及び騒音低減効果とその評価

< 4. 1 > CFDと実測値の比較

図5に後尾向き走行状態のCFD解析と実測値の比較結果を示す。車体上面の圧力について、CFD解析と実測結果は非常に良い一致を示している。一般的に後尾車では実測値からの乖離が大きくなるが、本結果は後尾車でも極めて良い一致を示している。ここにはCFD解析技術及び圧力分布設計技術の成熟が端的に示されている。

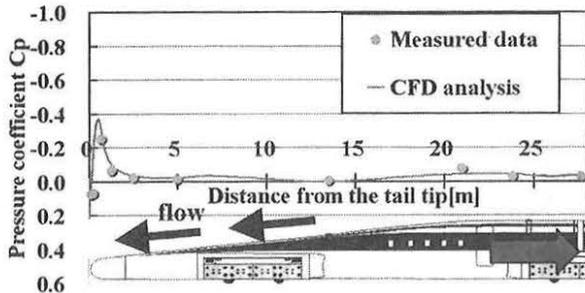


Fig.5 Surface pressure of the tail car

< 4. 2 > 後尾部剥離状況

図6に列車後尾部の圧力変動を示す。後端から1250mm、650mmの計測点では圧力変動が小さく剥離していないが、後端から200mmの計測点では圧力変動が大きく剥離している。従って、流れは後端近傍まで安定しており剥離領域は非常に小さい。剥離による車両振動や空気抵抗への影響は、剥離領域が小さい事によって抑制されていると言える。本Mc5新先頭形状は、トンネル及び緩衝工への突入に主眼を置いて先頭向きの設計をしたが、ここで示したように後尾状態も優れている。この先頭形状は、高速鉄道車両の双方向走行に対して一つの解を示している。

< 4. 3 > 空気抵抗

図7に3両編成の空気抵抗実測値を示す。いずれの編成の空気抵抗も速度の2乗に比例して増大している。新型車両編成は従来車両編成よりも空気抵抗が小さく、更に新型車両編成では、Mc5先頭車が後尾車状態での空気抵抗の

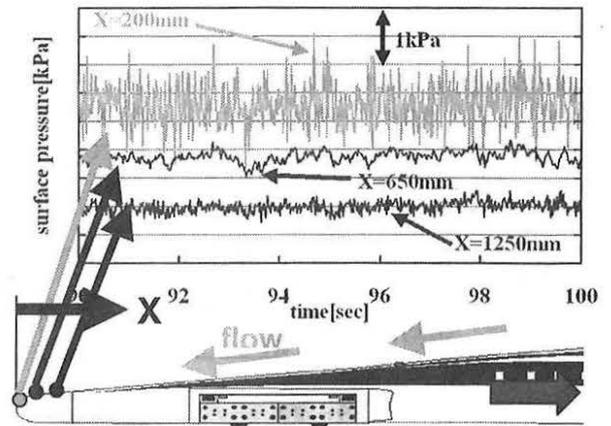


Fig.6 Pressure fluctuations at the tail end

方が先頭車状態よりも空気抵抗が小さい。先頭形状の差異に関しては、後尾車状態の空気抵抗の違いの方が先頭車状態におけるそれよりも大きいことが一般的に知られており、その常識通りの結果となった。この成果により、空気抵抗を従来よりも10%以上低減できる見通しを得、一層の省エネルギーを図ることができた。

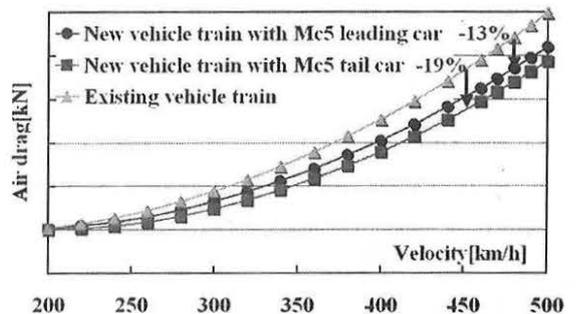


Fig.7 Air drag characteristics

< 4. 4 > 微気圧波

微気圧波に対する車両側評価はトンネル入口近くでの圧縮波圧力勾配を調べる事によって行う。速度500km/hで緩衝工付きのトンネルに突入する場合、トンネル入口から500m入った所のトンネル壁面で測定した圧力勾配を図8に示す。エア抜き窓が多数ある200m延長の緩衝工を設置しており、それ自体の圧力勾配低減効果が非常に大きいにも関わらず、新型車両Mc5による圧力勾配は従来のMc1車両の82%まで低減している。

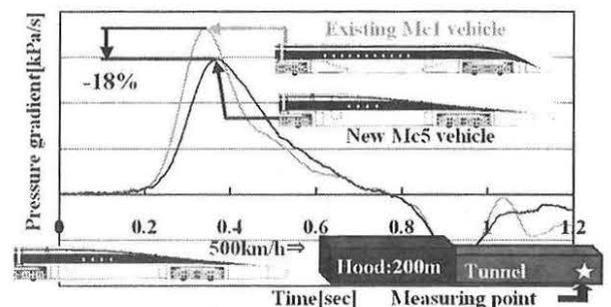


Fig.8 Comparison of pressure gradients

#### < 4. 5 > 空気振動

トンネル緩衝工から70m離れ、緩衝工入口から100m離れの位置で計測した空気振動について、音圧波形を図9に示す。音圧の負のピークに着目すると、新型Mc5車両の絶対値は従来車両と比較して76%に低減している。このピーク低減は先頭形状の違いによるものであり、先頭形状改善の効果が明確に現れている。

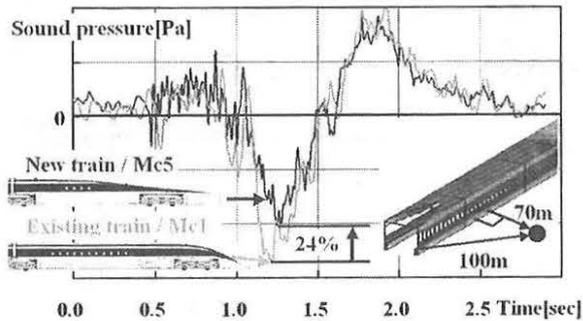


Fig.9 Comparison of low frequency noise

#### < 4. 6 > 車外騒音

図10は、車両から約4.5m離れ位置でパラボラマイクにて計測した車外騒音の波形を示している。先頭台車前部部分からの騒音レベルは、従来編成のそれと比較して新型車両では3~4 dBA低くなった。空力騒音のピークは局所流速増加と局所不整にて発生するため、局所形状への配慮が非常に重要であることを示す典型例と言える。

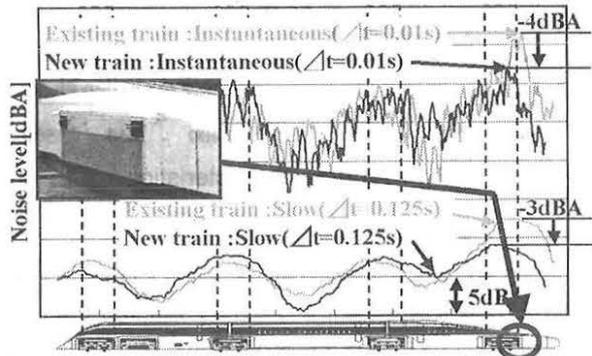


Fig.10 Comparison of outer noise

#### < 4. 7 > 車内騒音

前述の二重窓の空気層拡大及び構体～内装パネル間インシュレータ設置により、図11に示すように走行条件下での300Hz以上の周波数領域で内装板振動は低減した。

新型M4中間車の車内騒音は、図12に示す通り300Hz以上の周波数範囲で顕著に低減しており、車内騒音のオーバーオール値は走行条件で従来のM3中間車と比較して3dBA程度の低減を実現した。耳障りな高周波騒音も聴感上減少し、車内騒音の中心周波数は明らかにより低い周波数へとシフトしている。

### 5. 結論

本論文では、空力特性改善及び騒音低減を主な目的として開発、設計、製作を行った2両の新型車両について、その設計の考え方と走行試験結果の概要を述べた。空気抵抗、微気圧波、空気振動、空力騒音及び車内騒音の低減において、

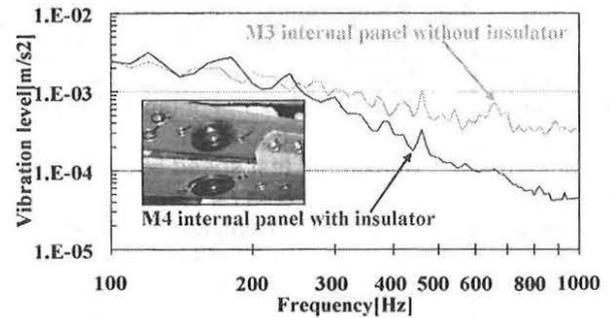


Fig.11 Insulator effect of internal panel

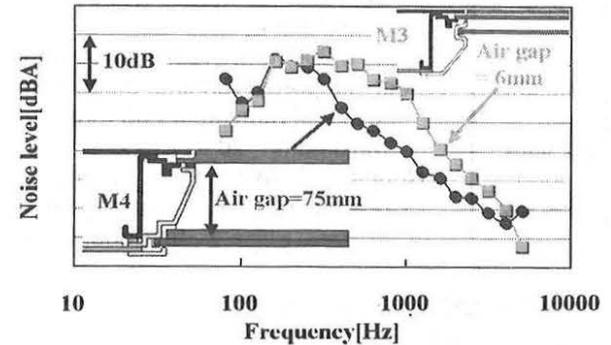


Fig.12 Comparison of internal noise level

基本仕様の見直し、先頭形状の変更、そして車体断面の角型化はいずれも有効であることが試験結果から明らかになった。

JRマグレブの基本的な性能は既にも実証され確立しており、現在は安定した繰り返し走行によって信頼性・耐久性を検証中である。居住性改善、耐久性・信頼性検証を行いつつ、環境影響とトータルコストを低減するため、本JRマグレブシステムの改良と最適化を今後も継続していく。

### 謝辞

本論文で紹介した山梨実験線用新型車両の開発・製作は、国土交通省の国庫補助を受けて行った。またこれらの車両を構成する要素技術開発は、Mc5車両は三菱重工業(株)、M4車両は川崎重工業(株)と共同で行った。ここに記して、謝意を表す。

### 参考文献

1. 小川隆申、藤井孝蔵 “定常流を用いた列車トンネル突入時の圧縮波波面こう配予測法”、日本機械学会論文集B編、第61巻、第586号、(1995)、pp.170-176
2. 小川隆申、藤井孝蔵 “微気圧波軽減のための理論的列車先頭形状設計法”、日本機械学会論文集B編、第62巻、第599号、(1996)、pp.139-146
3. N. Shirakuni, Y. Endo, K. Takahashi, K. Yamamoto, “Overview of new vehicles for the Yamanashi Maglev Test Line,” MAGLEV 2002.
4. S. Hosaka, M. Sugawara, K. Tsunoda, K. Yamamoto, “Improvements on new “MLX01” vehicles of the JR Maglev –Aerodynamic Characteristics-,” WCRR2003