

新型 APM iMAX の快適性向上

Development of New-Generation Automated People Mover iMAX

稲田 貴 臣 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 主査 博士（工学）
小池 裕 二 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 主幹 博士（工学）
鈴木 宏 ロジスティックスセクター新交通システムプロジェクト部 主査
高井 紀 浩 ロジスティックスセクター新交通システムプロジェクト部
河合 理 文 技術開発本部基盤技術研究所解析技術部 主幹 博士（工学）

新型 APM iMAX は海外市場をターゲットとしており、日本国内向け APM と比べて車両を大きくして乗車定員を増やすとともに、商品力を高めるべく快適性の向上のための各種検討を進めてきた。具体的には、優れたエクステリアデザインと実用性を両立させるためにコンポジット製車体を開発するとともに、さらなる乗り心地の向上を実現するために軌道面不整の改善やガイドレール平たんだの改善、車体剛性の改善に取り組んだ。本稿ではこれらの技術開発の内容を中心に iMAX について紹介する。

IHI has successfully delivered several unique Automated People Mover (APM) transit systems developed for urban and airport transit applications. The new-generation APM vehicle system named iMAX is designed to meet requirements of the rapidly changing market worldwide. Composite materials are used for the primary structures of the iMAX vehicle to achieve weight reduction and stylish exterior design. Investigations to provide the system with superior ride quality are carried out for improvement of the running surface and the guide rails of test trucks together with rigidity improvement of the prototype vehicle.

1. 緒 言

近年、主にアジア圏を中心に都市化が急速に進行し都市内の交通需要が高まる一方で、公共交通機関の整備の遅れから深刻な交通渋滞の発生が問題となっている。世界規模での温室効果ガス低減が必要とされるなか、環境意識の高まりもあり電車（地下鉄）や新交通システムの導入が各地で検討されている。新交通システムは静粛性の高いゴムタイヤを採用し、小半径のカーブも通過可能で無人（自動）運転できることを特長としており、モノレールや電車と比べて建設費も抑えることができる。そのため、すでにある程度の整備が進んだ都市には新交通システムが適している。

IHI グループの新潟トランス株式会社は、1972 年から APM (Automated People Mover) システムの開発に着手し、これまでに延べ 500 台以上の APM 車両と 1 200 台以上の APM 用台車を提供してきた実績がある。この技術をベースとして、当社はより大きな輸送能力が必要とされる海外向けの新型 APM iMAX を開発した。本稿では、新型 APM の快適性向上に向けた取り組みの概要を紹介する。

2. iMAX の特長

iMAX の基本諸元を第 1 表に示す。iMAX は共同開発先である株式会社韓国ファイバー（韓国 密陽市）と試作車を製作し、試走線で各種評価を進めてきた。

iMAX の外観を第 1 図に示す。iMAX の開発では従来の日本国内向け車両とは異なる価値の実現を目指しており、以下を特長とする。

2.1 スタイリッシュなエクステリアデザイン

交通システムの核である車両は、都市のシンボリック的存在となる。したがって車両のデザインはシステムを印象付けるものであり、同時に商品価値を高めるうえで重要である。

第 1 表 iMAX の基本諸元
Table 1 Principal specifications of iMAX

形 式	iMAX
車 両 タ イ プ	ゴムタイヤ 4 輪ステアリング方式
車 両 寸 法 (m) (1 両 当 た り)	L 12.5 × W 2.85 × H 3.68
車 体 の 主 要 材 料	GFRP
定 員 (人)	110 (座席 16 ~ 36)
最 高 運 行 速 度	70 km/h
案 内 方 式	側方案内 (両側、片側)
電 気 方 式	直流 750V / 三相交流 600V



第 1 図 iMAX の外観
Fig. 1 Exterior design of iMAX

る。iMAX は、社外の工業デザイナーに参画してもらい共同で意匠設計を検討し、従来の日本国内向けの APM 車両にはない三次元曲面を用いたスタイリッシュなエクステリアデザインを実現した⁽¹⁾。金属で車体（上部構体）を製作する場合、曲面を多用したデザインは生産性の面で問題となることがあるが、iMAX では車体をコンポジットで成形することでこの問題を解決するとともに、車体の軽量化も実現した。

2.2 明るく開放的な車内空間

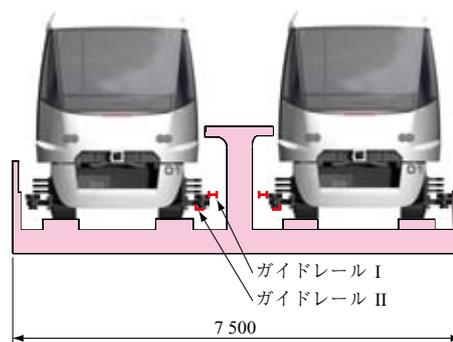
日本国内向けの APM 車両より車両寸法を大幅に拡大した車体は、空調関連システムを床下に設置し、吹き出し口を窓の下部に設けた構造として天井部をすっきりとしたデザインとするとともに、第 2 図に示すように窓を大きくすることで明るく開放的な車内空間を実現した⁽¹⁾、⁽²⁾。

2.3 片側案内方式の採用

APM 車両では台車から伸びたアーム部先端に取り付けたガイドローラをガイドレールに当てることでステアリングを行う方式を採用しており、このガイドローラとガイドレールが車両の左右両側に備え付けられている両側案内方式が一般的である。これに対して iMAX では第 3 図に示す片側案内方式を開発し、車体寸法を拡大しても日本国



第 2 図 明るく開放的な車内空間
Fig. 2 Ample interior space of vehicle



第 3 図 片側案内方式の場合の軌道プラン（単位：mm）
Fig. 3 Single side guidance system (unit : mm)

内向きの APM 車両と同等の軌道幅で走行できることを狙った。試走線で片側案内方式、両側案内方式の両方でテストを行い、安全性と耐久性評価を実施した。

iMAX の快適性を向上させるうえで特に注力したのは、デザイン性と実用性を両立させるためのコンポジット製車体の開発と、さらに優れた乗り心地を実現するための技術開発であり、この 2 点について以下に詳細を述べる。

3. コンポジット製車体の開発

3.1 材料試験

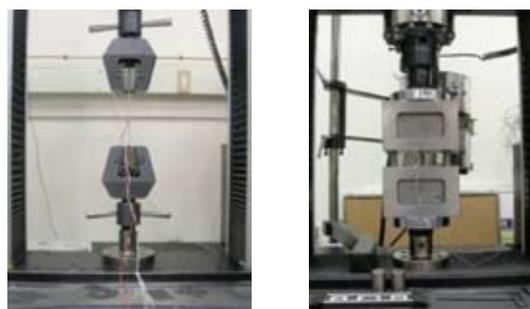
コンポジット製車体の開発に先立ち、車体に適用するコンポジット（GFRP：Glass Fiber Reinforced Plastics）材料の選定と機械的特性取得のための静的試験（第 4 図）、疲労特性取得のための疲労試験を実施した⁽³⁾。後述のとおり、車体に適用するコンポジット材料は十分な耐火性をもつものとなっている。

3.2 製造方法

継目がなく耐熱性にも優れた車体とするため、車体の成形方法としてオートクレーブ（加圧・加熱ができる成形釜）を使って一体で成形する方式を採用した。三次元 CAD データを基に第 5 図に示す木型を製作し、この木型から製作した FRP 製の型の内側にコンポジット材料で

(a) 引張試験

(b) 圧縮試験



第 4 図 コンポジット材料の静的試験の様子（例）
Fig. 4 Static testing of composite materials



第 5 図 車体の木型
Fig. 5 Wooden mold for carbody

ある GFRP プリプレグを積層し、それをオートクレーブ内で圧力を掛けた状態で熱を加えて成形する（第 6 図）。このとき、車体の剛性を高めるためのアルミハニカムや金属フレームも同時に組み込み、第 7 図に示す車体を製作した⁽³⁾。

3.3 強度評価試験

製作したコンポジット製車体は JIS E 7105⁽⁴⁾ に従い強度評価試験を実施した。JIS E 7105 で規定されている評価試験項目のうち、今回は第 2 表に示す試験を実施した。



第 6 図 オートクレーブ
Fig. 6 Autoclave



第 7 図 完成したコンポジット製車体
Fig. 7 Finished composite carbody

第 2 表 JIS E 7105 での評価試験項目
Table 2 Static load test items defined by JIS E 7105

試験の種類	測定項目			
	応力	変位量	固有振動数	負荷荷重
垂直荷重試験	○	○		○
車端圧縮荷重試験	○	○		○
ねじり荷重試験	○	○		○
3点支持試験	○	○		○
曲げ固有振動数試験			○	
ねじり固有振動数試験			○	

一例として、垂直荷重試験の様子を第 8 図に示す。垂直荷重試験では、油圧シリンダを用いてフロア面に荷重を載荷し、車体のたわみやひずみを計測した。

3.4 耐火性試験

万一、火災が発生した場合にも乗客が安全に避難できるように、車体には耐火試験規格に適合した材料を採用した。車体に使用されている GFRP 材料には、優れた耐火性能を確保できるように特別に調整した樹脂を使用した。耐火性試験の一例として、アメリカの耐火基準である NFPA130⁽⁵⁾ の要求に従い実施したフロア構造の載荷耐火試験の様子を第 9 図に示す。本 APM 車両では GFRP とバルサのコア材でできたサンドイッチパネルと金属を組み合わせたフロア構造を採用しているため、床面（非加熱面）の温度上昇を緩やかにすることが可能であり、NFPA130 の要求を十分に満足している。



第 8 図 垂直荷重試験の様子
Fig. 8 Vertical load testing of carbody



第 9 図 フロア構造の載荷耐火試験の様子
Fig. 9 Fire resistant testing of the floor structure

4. 乗り心地向上のための検討

iMAX は窓を大きくすることで明るく開放的な車内空間を実現しているが、車内の快適性という点では優れた乗り心地をもつことが必要不可欠である。そこで、さらなる乗り心地向上のための検討を実施した⁽⁶⁾。

4.1 軌道面不整の改善

乗り心地向上のためには、軌道面の凹凸（以下、不整）を極力減らすことで車体への入力を小さくすることが望ましい。そこで、不整改善の実施前後で乗り心地に変化があるかどうかについて、試作車の走行試験データの分析を実施した。

改善前後における軌道面不整の状況をパワースペクトル密度で比較した結果を第10図-(a)に示す。軌道面の改善後はパワースペクトル密度が低減し、不整が小さくなっていることが分かる。第10図-(b)は、第10図-(a)の各軌道面に対して走行試験で得られた台車および車体の上下方向の加速度応答を比較した結果である。台車の上下振動が低減したことに伴い、車体の上下振動も低減されていることが分かる。

4.2 ガイドレール平坦度の改善

上下方向の乗り心地については軌道面不整の改善が有効であるのに対して、左右方向の乗り心地についてはガイドレール平坦度に手を当てるのが有効であると考えられる。そのため、レール幅の調整とともに、レールとガイドローラとのすき間を調整した。また、車両ができるだけ直進性を保持するように台車の調整も実施した。

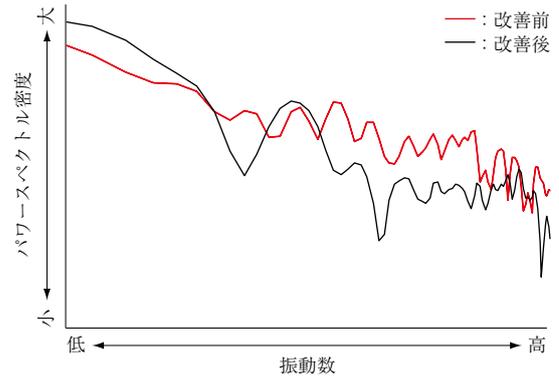
調整前後の車体のヨーイング角の計測結果を第11図に示す。ガイドレール平坦度を改善することで、ヨーイング角は調整前の半分以下となることが確認できる。

4.3 車体剛性の改善

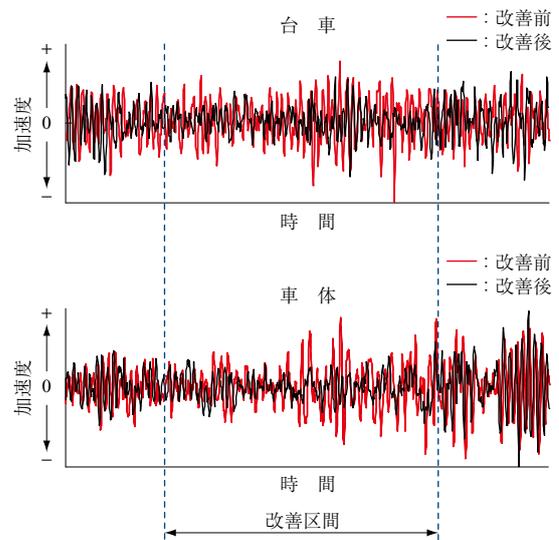
4.3.1 車体の動的応答の分析

車体剛性の改善による乗り心地向上の可能性について検討するため、はじめに車体の動的応答解析のための力学モデルを作成し、車体剛性が上下振動に及ぼす影響を評価した。

(a) 軌道面不整のパワースペクトル密度



(b) 台車と車体の上下方向加速度の時刻歴応答

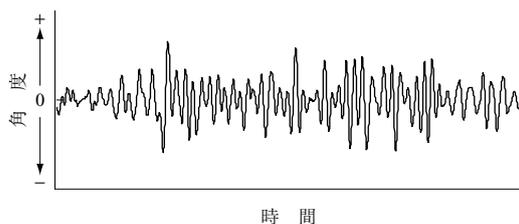


第10図 軌道面不整の改善効果

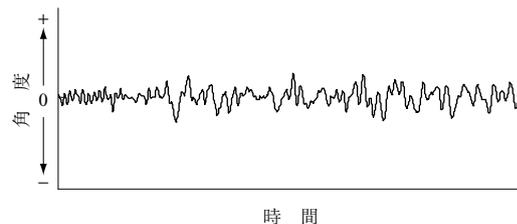
Fig.10 Effectiveness of improvement in irregularities of the running surface

車体の弾性振動を考慮した上下振動系の力学モデルを第12図-(a)に示す。車体の弾性振動には、一次曲げ振動を対象にあげる。これを質量、ばねおよび減衰からなる振動系で表し、空気ばねで支持された車体側に加え、全体として三自由度系で構成する。第12図-(b)は、軌道面の不整に対する車体の伝達特性である。曲げの固有振動数を台車の共振振動数に近接させた f_0 から高くした場合の変化

(a) 調整前

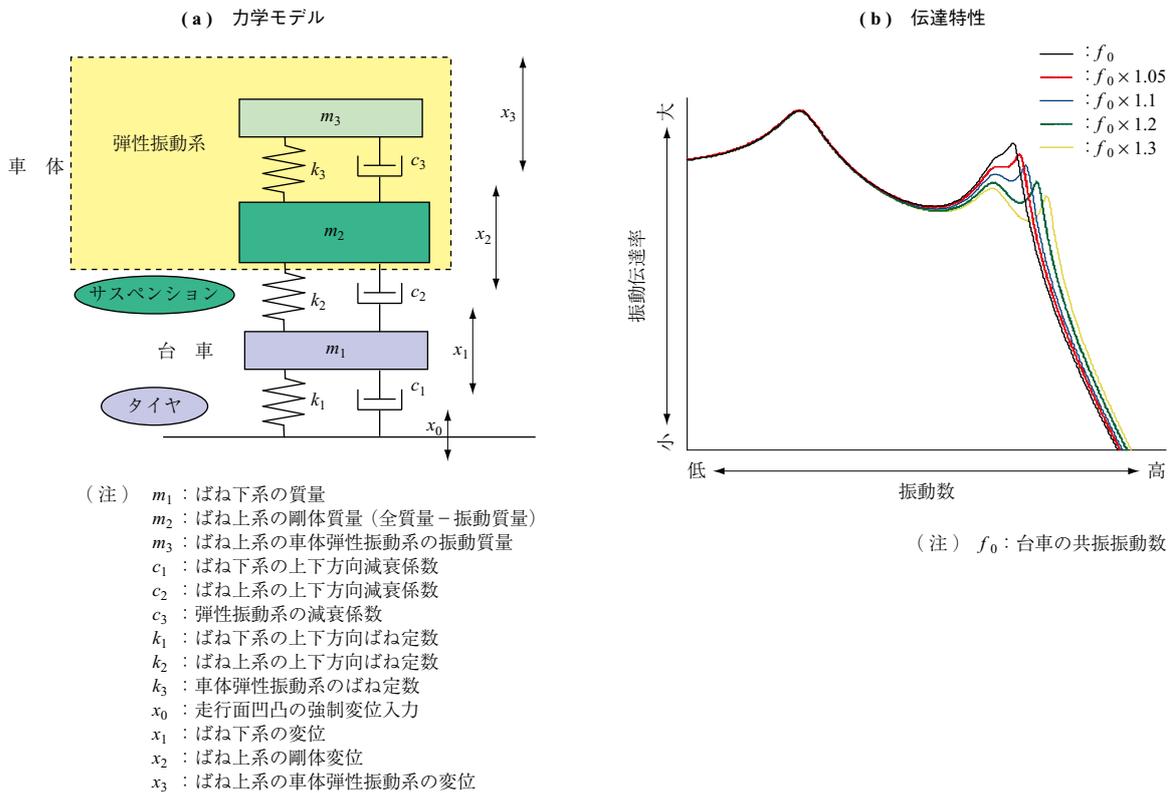


(b) 調整後



第11図 ガイドレール平坦度の改善効果

Fig. 11 Effectiveness of improvement in unevenness of the guide rail



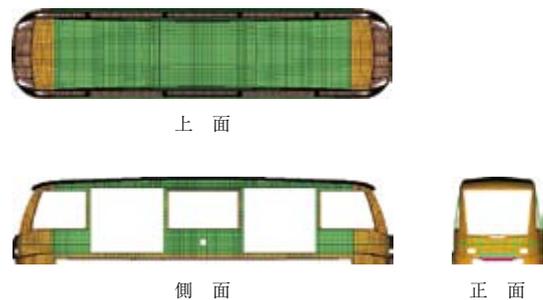
第 12 図 弾性振動を考慮した上下振動系の力学モデル
 Fig. 12 Dynamic model and body transmissibility

を示している。曲げの固有振動数をできるだけ高くし、台車の固有振動数から離すことができれば、車体と台車との共振が緩和され、車体の応答を小さくできることが分かる。

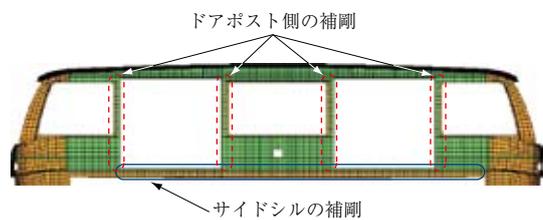
4.3.2 車体の補剛効果の予測および検証

前述の検討によって、曲げの固有振動数を高めることは車体の応答低減に効果があることが確認されたことから、固有振動数を高めるための車体の補剛方法について検討した。

車体の補剛方法の検討には第 13 図に示す有限要素解析モデルを用いた。iMAX は金属製アンダフレームにコンポジット製の車体（上部構体）を取り付けた構造となっている。車体の補剛方法としては、上部構体を補剛する場合とアンダフレームを補剛する場合の二通りが考えられる。そこで、第 14 図に示すように、上部構体の補剛方法としてドアポスト部の補剛、アンダフレームの補剛方法としては試作車での改造が容易なサイドシル部の補剛を取り上げ、それぞれの補剛を行ったときの上部構体の固有振動数を固有値解析によって求めた。この結果、上部構体の曲げの固有振動数を高くするためには、アンダフレーム部の補剛が有効であるが、ドアポスト部の補剛も少なからず効果のあることを確認した。また、同結果を基に、走行試験中の試作車に対して上述の補剛を施し、補剛前後における曲げの固有振動数の変化を計測した結果、おおむね、解析



第 13 図 補剛方法検討のための FEM モデル
 Fig. 13 Finite element model used for carbody rigidity improvement



第 14 図 車体の補剛箇所
 Fig. 14 Modified parts of the carbody for rigidity improvement

どおりに固有振動数が上昇していることが確認された。

4.4 乗り心地の総合評価

前節までに述べてきた、軌道面不整、ガイドレールの平坦度および車体剛性の 3 点の施策を総合的に施した場合の乗り心地を評価する。第 3 表および第 4 表は、時速 70 km/h における上下方向および左右方向の振動計測結果

第3表 乗り心地評価結果（旧国鉄）

Table 3 Results of ride quality evaluation (Japanese National Railways)

乗り心地レベル (dB)	判 定	上 下		左 右	
		iMAX	ゆりかもめ	iMAX	ゆりかもめ
$L_t < 83$	非常に良い			○	
$83 \leq L_t < 88$	良 い	○	○		○
$88 \leq L_t < 93$	普 通				
$93 \leq L_t < 98$	悪 い				
$98 \leq L_t$	非常に悪い				

(注) L_t : 乗り心地レベル

第4表 乗り心地評価結果（ISO 2631）

Table 4 Results of ride quality evaluation (ISO 2631)

乗り心地レベル (dB)	判 定	上 下		左 右	
		iMAX	ゆりかもめ	iMAX	ゆりかもめ
< 100	非常に良好			○	○
100 ~ 105	良 好				
105 ~ 110	普 通	○	○		
110 ~ 115	少々不快				
115 ~ 120	不 快				
120 ~ 125	非常に不快				
> 125	極めて不快				

から、旧国鉄の基準⁽⁷⁾ および ISO 2631⁽⁸⁾ によって求めた乗り心地の判定結果である。同表のとおり、本 APM の乗り心地は、目標とした「ゆりかもめ」のレベルにほぼ到達し、左右方向においては同車をもしのぐ性能を達成していることが確認された。

5. 結 言

車体が大きくて輸送能力の高い海外市場向けの新型 APM iMAX を開発した。iMAX は明るく開放的で、かつ、快適な車内空間の実現を目指してコンポジット製車体を採用するとともに、乗り心地向上に向けた各種検討を行い、試作車を用いてその有効性を確認した。今後も iMAX が海外市場で広く受け入れられるよう、積極的に営業活動と技術開発を進める所存である。

— 謝 辞 —

コンポジット製車体をはじめとして、iMAX 開発では株式会社韓国ファイバー（韓国 密陽市）の関係各位にご協力をいただきました。ここに記し、感謝いたします。

参 考 文 献

(1) N. Takai, G. Nagahara, S. Suzuki, M. Kawai and S. Kitade : Next Generation APM : Design for

Advanced Vehicle The ASCE APM2007 Technical Committees (2007)

(2) Y. Koike, M. Tanaka and T. Fujioka : Next Generation APM : Analysis on Running Behavior The ASCE APM 2007 Technical Committees (2007)

(3) T. Inada, G. Nagahara, SC Lee, DH Kim, M. Kuwabara and T. Hoshii : Advanced Composite Carbody Systems The 12th International Conference on Automated People Movers (2009) pp. 525 - 533

(4) JIS E 7105 : 鉄道車両 - 旅客車用構体 - 荷重試験方法

(5) ANSI / ASCE / T&DI 21.2 - 08 Automated People Mover - Part 2

(6) K. Tatecho, M. Kawai, Y. Koike, M. Tanaka, M. Kuwabara and T. Hoshii : Advances in Passenger Convenience and Comfort The 12th International Conference on Automated People Movers (2009) pp. 534 - 545

(7) 社団法人日本機械学会 : 鉄道車両のダイナミクス 最新の台車テクノロジー 株式会社電気車研究会 1994年 pp. 70 - 71

(8) ISO 2631-1 Second edition (1997)