

シンガポールLTA 向けAPM システム “クリスタルムーバー”

Automated People Mover System for LTA Singapore "Crystal Mover"

持 留 裕 之 増 川 正 久 鈴 木 康 之
 柏 誠 貞 光 伸 一 河 野 浩 幸



当社は、シンガポールLTA (Land Transport Authority) 向けにゴムタイヤ方式のAPM (Automated People Mover) システムを受注し、独自に開発したAPM車両“クリスタルムーバー”を初めて市場投入した。このクリスタルムーバーは、優れたデザインとともに人と環境にやさしく海外市場のニーズにも適合した輸出車両である。また、シンガポールLTAへの導入に当たっては規格等お客様固有の要求仕様にも柔軟に対応している。本報では、クリスタルムーバーとその安全で快適な運行を支えるサブシステムについて紹介する。

1. はじめに

近年、東アジア及び東南アジア諸国では都市化の進行に伴い都市内交通がひびく化しているケースが多く見られる。また、環境負荷の低減は地球規模での課題となっている。このような中で各国とも地下鉄や新交通システムなどの軌道系交通システムを中心とした都市内交通体系の整備・建設を積極的に進めている。

当社は、シンガポール陸運局 (Land Transport Authority ; LTA) よりセンカン・ブンゴル地区向けAPM (Automated People Mover) システムを受注した。既に2003年1月センカン線が開業し、引き続き2004年のブンゴル線開業に向けて車両の製作及びシステムの工事が進捗中である。本報では、システムの核となるAPM車両とその安全で快適な運行を支えるサブシステムについて概要を報告する。

2. APMシステムの概要

シンガポールLTA向けAPMシステムは、新設される地下鉄北東線のセンカン駅及びブンゴル駅からニュータウン内へのフィーダ線である。センカン線、ブンゴル線共に東西二つのループ線で形成され、東西のループ線は地下鉄連絡駅で合流するように路線設定されている。センカン線は全長10.69 kmに14駅、ブンゴル線は全長9.47 kmに15駅が設置されている。システムの輸送力は、センカン線2 100 PPHPD (Passenger Per Hour Per Direction)、ブンゴル線2 700 PPHPDで計画されている。

本APMシステムは国内の新交通システムをベースとしており、表1に示すように車両とサブシステムから構成されている。

車両の運行は、自動列車制御装置 (ATC) による全自動無人運転である。ATC装置は、AVP、AVO、AVSで構成され

表1 APMシステムの構成

サブシステム	主たる構成要素	機能
車両	車両	輸送単位
運行管理装置	運行管理装置	全システムの運用・管理
信号装置	AVP/VD装置,	信号・保安機能
通信装置	LCX伝送装置	地上・車両間の通信
自動運転装置	車上AVP/AVO装置, 駅AVO装置	車両の自動運転
電力・電路設備	変電設備, 電車線	システム・車両への電力供給
軌道	走行路面, 案内軌条, 転てつ器	車両の走行路線
駅設備	料金収受装置, 案内表示装置	料金の収受, 旅客案内サービス
メンテナンス設備	車両基地, メンテナンス機器	車両のメンテナンス設備

(注) AVP/VD: Automatic Vehicle Protection/Vehicle Detection
 AVP: Automatic Vehicle Protection
 AVO: Automatic Vehicle Operation

ている。AVPは信号保安装置として車両の安全運行を支えている。AVOは車両の自動運転制御を行っている。AVSはシステムの運転指令、運行監視、運行記録の機能を有している。

3. APM車両の開発

3.1 APM車両の概要

車両は、ゴムタイヤ方式のAPMである。1両に定員105人の乗客を乗せ全自動無人運転される。車両の形式を図1に示し、車両の主要諸元を表2にまとめる。

本APM車両は、これまで当社が手掛けてきたゴムタイヤ式新交通システム車両を基本に海外市場をターゲットとして新たに開発したものである。案件ごとに異なる輸送需要に柔軟に対応するため従来車両に比べ大型化、単車化そして高速

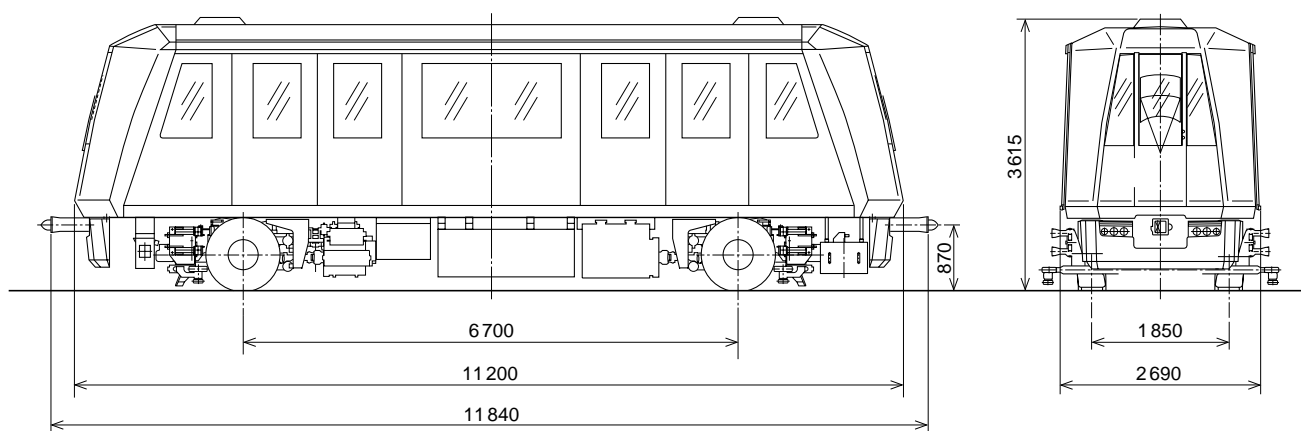


図1 車両形式図

表2 車両の主要諸元

項目	諸元
編成	単車
定員 (人)	105 (内座席18)
車両質量 (t/両)	14.9
車両寸法 (mm)	長11840×幅2690×高3615
案内方式	側方案内2軸4輪ステアリング方式
電気方式	直流750V
軌間 (mm)	軌間1850, 案内面間隔3200
車両性能	最高速度 車両性能 80 km/h
	運行 70 km/h
	加速度 1.0 m/s ² (3.6 km/h/s)
	減速度 常用最大 1.0 m/s ² (3.6 km/h/s) 非常 1.3 m/s ² (4.7 km/h/s)
車体構造	アルミニウム合金溶接構造
主電動機	三相誘導電動機 連続定格80kW×2台
制御方式	VVVFインバータベクトル制御(各軸個別制御) (応荷重制御・回生ブレーキ付)
ブレーキ方式	回生ブレーキ併用電気指令式空気ブレーキ (保安ブレーキ/駐車ブレーキ付) (応荷重制御・滑走制御付)

化している。プロトタイプ車両を1両試作し基本性能・機能を検証した後、今回のシンガポールLTA向けに内外装デザインの具現化、客先要求仕様への適合等の商品化、量産化設計を行った。

以下の節では、車両における主な開発項目及び新設計項目について概要を述べる。

3.2 意匠設計

車両はシステムの核であると同時に顔である。したがって、その車両のデザイン(内外装)は、お客様に車両そしてシステムを第一に印象付けるものである。今日、車両デザインは商品価値を高め他車両との差別化を図る上で重要な要素となっている。

このような背景のなかで、本APM車両の開発においては社外の工業デザイナーに参画してもらいデザインの提案から監修までを業務委託した。工業デザイナーとの共同作業によりデ

ザインの具現化と生産設計的な機能・性能との両立に注力した結果、本APM車両に対し第32回機械工業デザイン賞“経済産業大臣賞”を受賞することができた。

3.2.1 デザインコンセプト

車両のデザインコンセプトは、本APM車両を今後の当社の輸出戦略車両とするという位置づけで導いた。デザインコンセプトを言い表すキーワードは“CRYSTAL”である。この“CRYSTAL”には、Universal(世界共通の、普遍的な)、Distinctive(ほかにはない特有の)、Futuristic(未来の)、Diamond-like(ダイヤモンドのような)という意味を持たせている。このデザインコンセプトに基づく車両を“Crystal Mover(クリスタルムーバー)”と名付けるとともに商標登録し新たな商品ブランドとして戦略的に展開している。

3.2.2 エクステリアデザイン

エクステリアデザインは、車両全体でクリスタルイメージの具現化を図っている。特に先頭形状は、全自動無人運転で運転室が不要というAPM車両の特徴をいかし、大胆にカットした多面体で構成している。しかし、各面は平面ではなく微妙な3次曲面としており多面体による鋭角なイメージを和らげ洗練された都会的な豊かさと落ち着きを与えている。車体外装はパールホワイトとインディゴブルーで塗り分けし、同時にウインドウグラフィック(窓形状)をデザイン的に調和させ、従来にない明快なスタイルとなっている。

3.2.3 インテリアデザイン

インテリアデザインは、デザインコンセプトと客室内に必要とされる機能との融合を図った。乗客に対する情報を客室コーナ部に集約して配置し、視認性と機能性を向上している。具体的には、車両前面に向かって左側のコーナに路線図等の運行サービス情報を、右側のコーナには非常時の情報として非常停止ボタンや非常通報装置及びそれらにかかわる注意・警告ラベルを配した。併せて各コーナにはLCD情報表示装置も1台ずつ配置している。また、車内のグラフィックサインについても顧客の要件を遵守しつつデザイナーの意見を取り入れデザイン性の向上を図った。

車内の配色は、側面及び天井の白色と床面のグレー色を基調としている。それに腰掛はグレイッシュなブルー、手摺り及び握り棒はワインカラーとしてアクセントを加えた。この

ような配色により、とかく白またはグレー系の内装に金属色の手摺り等が配置され無機質となりがちな車内を明るくかつ親しみやすいイメージにまとめている。

車内の見付を図2に示す。

3.3 乗り心地設計

車両の乗り心地は、車両の振動伝達特性と走行路面の凹凸性状（凹凸量と凹凸波長）の両者によって決まってくるものであり、車両と走行路面の境界に存在する技術領域である。そこで、快適な乗り心地を実現するために、走行路面の凹凸性状を考慮した車両の振動乗り心地解析を行い、車両振動伝達特性の適正化設計と路面凹凸性状の適正な施工管理を実施し、良好な乗り心地を実現している。

車両の振動乗り心地解析の概念を図3に示す。

3.4 衝突安全設計

軌道系交通システムでは信号保安システムにより車両同士の衝突防止が担保されているが、近年の海外案件においては

信号保安システムへの要求とは別に車両に衝突安全性を要求される場合が多くなっている。本APM車両では、車両同士が衝突した場合でも客室空間に崩壊が至らぬこととして崩壊部分の長さは1m以内に収めることとの要求が出された。

衝突安全性は、軌道系交通システムの車両ではまだ十分に確立されていない技術分野である。そのため、今回、先進の自動車の衝突安全技術及び設計手法の導入と応用を図った。

以下に衝突安全設計の要点を述べる。

3.4.1 衝突条件と設計目標

APMシステムでは、信号保安システムにより車両同士の衝突防止が図られているため、システム全体の安全性能と整合性をとりつつ車両で担保すべき衝突条件と衝突安全性能の目標値を導いた。これらを表3にまとめる。表に示すように、車両同士の衝突は限定された手動運転時にのみ人為的ミスにより発生すると条件を導いた。また目標値は、衝突安全に対する要求仕様と車両の基本仕様、強度条件等と整合性をとって導いたものである。

3.4.2 衝突エネルギー吸収のシナリオ

衝突安全性の確保には、適切な衝突エネルギーの吸収とそれによる衝突衝撃の緩和を行うことが重要である。衝突時における衝突エネルギー吸収のシナリオを図4に示す。衝突エネルギーは、連結器の緩衝装置と車体に設けた衝突エネルギー吸収構造（後述するメカニカルヒューズ）によって吸収さ



図2 車内見付

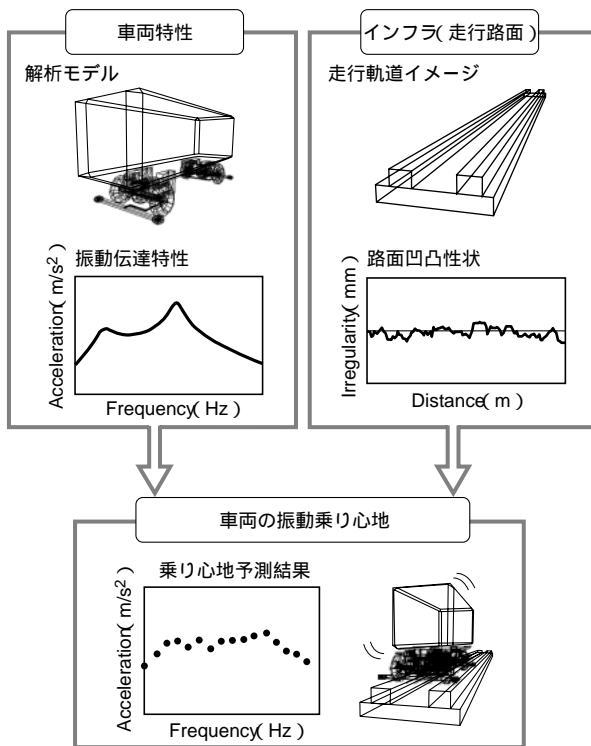


図3 車両の振動乗り心地解析の概念

表3 車両の衝突条件と設計目標

項目	諸元	
衝突条件	運転条件	車上 AVP 保護下での手動運転
	衝突条件	同質量同速度の車両同士の正面衝突
	衝突時の車両質量	定員乗車質量
	衝突速度	11 km/h
設計目標	偏倚条件	上下方向オフセット 左右方向オフセット 曲線での車両相互の姿勢角を考慮
	崩壊部分の長さ	車両先頭部 0.5m 以下 客室に及ばないこと
	吸収エネルギー	110 kJ 以上
	衝突時の衝撃力	300 kN 以下

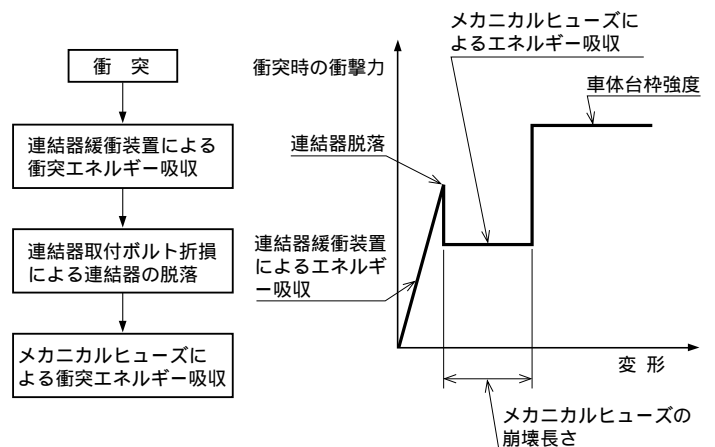


図4 衝突エネルギー吸収のシナリオ

れる．特に，連結器の緩衝能力を超えるような衝突では車体同士が衝突し車体の先端部に設けられた衝突エネルギー吸収構造が変形及び崩壊し衝突荷重を規定値以下に抑えながら均一で安定した衝突エネルギーの吸収を行う．

3.4.3 衝突エネルギー吸収構造

車体構造の一部に衝突エネルギー吸収構造を設け，他の強度要件と両立を図りながら車体構造を最適化することは難しい課題である．そのため，本APM車両では別体の衝突エネルギー吸収構造物（メカニカルヒューズ）を車体に取り付ける方式を採用した．このメカニカルヒューズは，三菱ふそうトラック・バス（株）により原子力燃料搬送車両用に開発されたものを基本としており，鋼製の穴明き角錐チューブ構造をしている．先端に受けた衝突荷重によりチューブが座屈変形し，衝突エネルギーの吸収を行うメカニズムである（図6）．

メカニカルヒューズは，車体先端下部の左右に取り付けられている．また，車体構造の先頭部構造は，通常の荷重には強度を保ちつつ，衝突荷重に対しては崩壊しやすいように穴明け等により変形・崩壊モードに対し方向性を持たせてある．

3.4.4 構造の設計と検証

APM車両の衝突エネルギー吸収構造の設計から検証に至る大まかな流れを図5に示す．

基本設計を終えた後，メカニカルヒューズについてCAE解析と要素試験により詳細設計と検証を同時並行的に実施した．各ステップにおける解析及び要素試験は，所期の目論見を満足するまで設計を改良しながら繰り返し実施している．メカニカルヒューズについては，実物単体での衝突試験を実施し最終的な動的破壊特性と座屈モードの検証を行った．図6にヒューズの変形モードに対する解析と試験結果の比較を示す．図6に示すように変形モードは解析と試験結果がよく一致している．同時に，衝突エネルギー吸収特性についても解析と試験結果はよく一致し所定の目標仕様を満足している

ことを確認した．このように，メカニカルヒューズが所期の衝突特性を有していることが検証され，同時にCAE解析の妥当性も検証された．

最後に，メカニカルヒューズを取り付けた車両全体での衝突特性の評価を行った．検証は，先に妥当性が確立されたCAE解析のみとし実車による試験は省略した．直線上で正面衝突させた場合の衝突解析結果を図7に示す．図に示すように衝突後の車両前頭部の崩壊長さは0.27 mであり設計目標の0.5mを満足している．

また，安定した変形及び崩壊がなされていることも分かる．さらに，曲線上での斜め衝突についても同様にCAE解析に

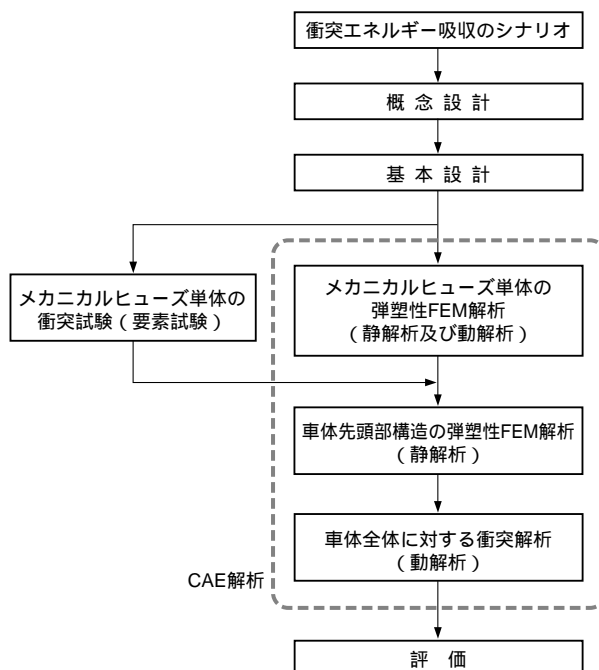


図5 衝突エネルギー吸収構造の設計フロー

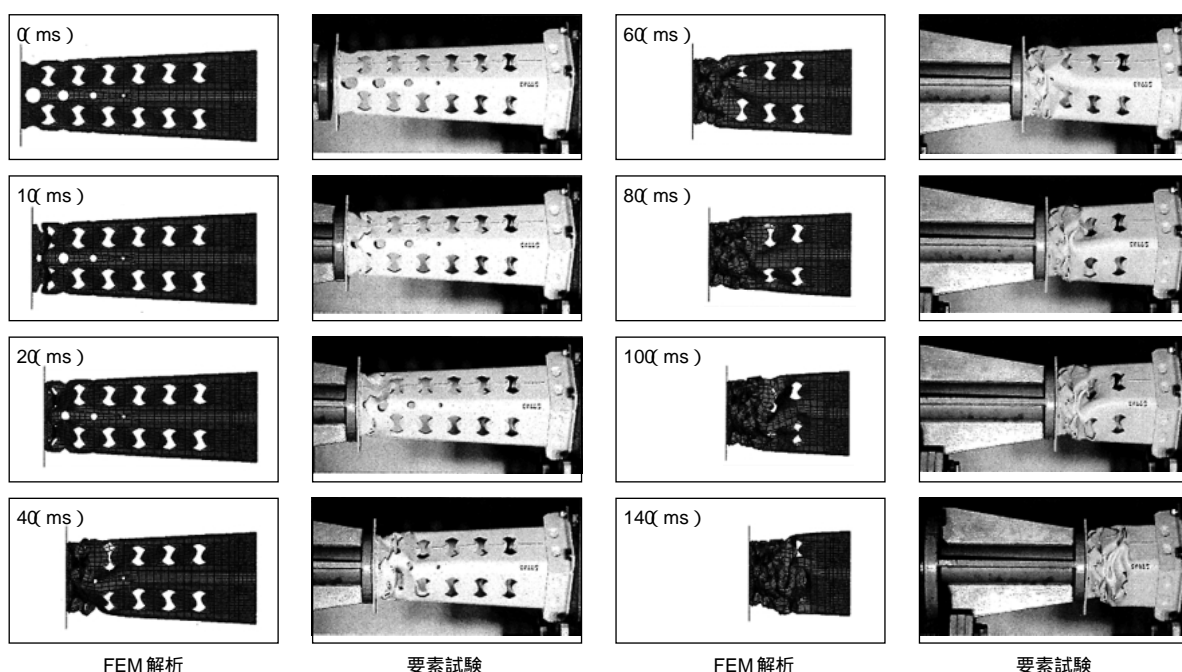


図6 メカニカルヒューズの変形過程

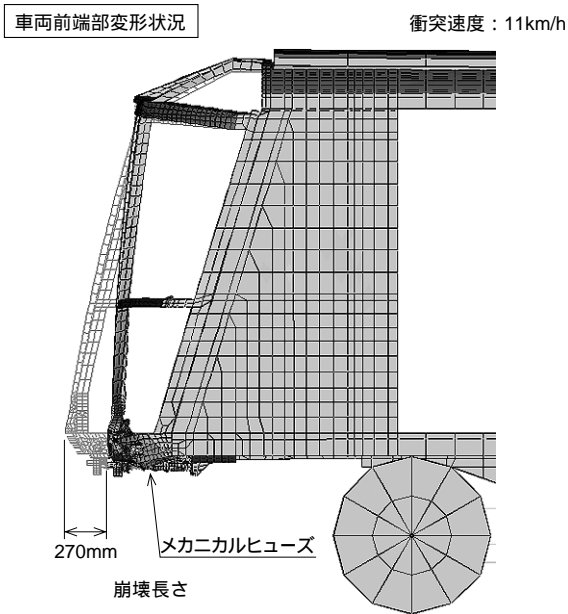


図7 車両衝突解析結果

より良好な結果を得ている。

このようにCAE解析と要素試験を効果的に活用し車両の衝突エネルギー吸収構造の設計と検証を行い、目標仕様を満足する良好な結果を得ることができた。同時に精度の良いCAE解析により大掛かりとなる実車試験を省略でき大幅な開発期間の短縮と費用の低減を達成できた。

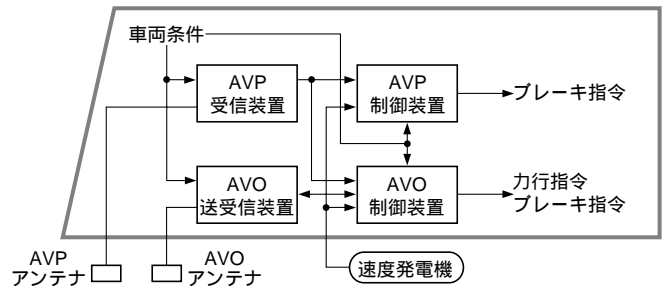
3.5 車上自動運転制御装置 (AVP, AVO) の統合

信号保安及び自動運転システムは国内新交通システム的方式に準じている。これらのシステムを構成する車上装置は全自動無人運転を行うAPM車両に特有の装置である。単車かつ車体の小さい本APM車両の開発において、客室内の狭い艙装スペースに収納できるようこれらの機器の小型・軽量化が必須条件であった。

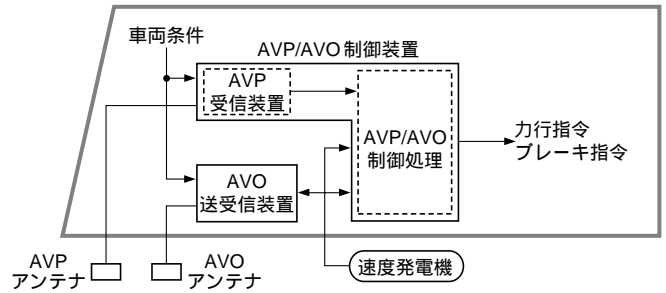
これに対し、従来機能ごとに機器が独立しかつメーカー別々であった機器構成を見直し、機能のインテグレーションとともに車上制御装置の統合と機器の小型・軽量化を行った。具体的には、保安装置であるAVP受信装置とAVP制御装置及び自動運転を行うために必要なAVO制御装置を一つに集約した装置を開発して小型・軽量化と付帯する艙装配線の削減を図った。

図8 (a) に従来の車上制御装置の装置構成を示す。図に示すように、AVP制御装置とAVO制御装置の装置構成には速度発電機入力や運転台入力などの入出力信号に共通点がある。この点に着目し、AVP制御装置とAVO制御装置の同一CPU化とハードウェア共用化をし、さらにこれにAVP受信装置を同一箱体に収納した。その結果、図8 (b) に示すようにAVP信号の受信から列車制御、自動運転までの制御を1つの装置で実現することができた。

AVPは列車の安全を確保する保安装置であり、AVOは自動運転を行う装置である。目的や性格の異なるこの2つの装置の機能の一体化において、最優先の条件は保安装置であるAVPの機能を失ってはならないことである。これに対し以



(a) 従来の装置構成



(b) AVPとAVOを一体化した装置構成

図8 車上自動運転制御装置の装置構成

下のように考え方を整理した。

- ① 保安に関する機能を有するAVPのソフトウェアは、AVOと分離してその安全性を確保する。
- ② AVO演算はAVPプログラムの空き時間（CPUが利用されていない時間）で実行し、かつAVPとAVOは機能や制御論理を完全に独立させる。
- ③ AVPとAVOで変数を共有することは禁止する。ただし、AVOがAVPの処理結果を参照することは許可する。

以上により、本装置のソフトウェアは、AVPとAVOそれぞれの機能を明確に分離され独立性を保つことになり、保安装置としての役割や安全性が確保されている。

ソフトウェアの演算処理は、従来からの単一の定周期割込により一連のプログラムが順次直列に処理されるシングルスレッド構造としている。一体化においてはAVPとAVOの2つの機能の処理が必要となるが、これらを並列に処理させる構造とはせずシングルスレッド構造を保つこととした。すなわち、AVPに関する処理の後にAVOに関する処理を追加して、これらが直列に実行されるようなプログラムとし、プログラムの構造が複雑になることを避けた。図9にソフトウェア一体化の概念を示す。

AVP制御に関する機能は並列二重系、AVO制御に関する機能は待機二重系の構成としており、信頼性を向上させている。AVP制御とAVO制御は同一CPUシステム内で動作するが、機能上はAVPとAVOに分離されたため、故障の内容もAVPに関するものとAVOに関するものとの2種類を設けている。

ハードウェアの自己診断（CPUの故障照査など）はAVPに関する機能としており、照査の結果故障と判断した場合には他系に切り換えるようにしている。AVPの故障の内容にはAVPとAVOの共有ハードウェア故障が含まれるため、同

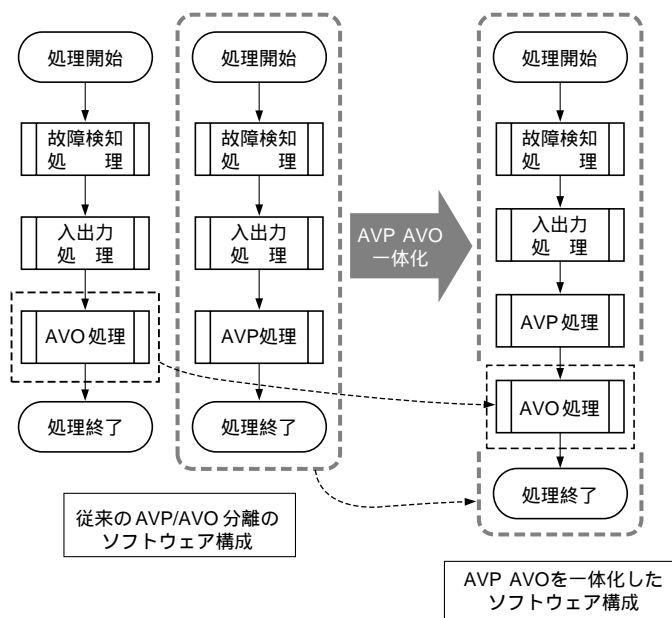


図9 AVPとAVOのソフトウェア一体化の概念

時にAVOも故障にしているようにしている。

AVOに関する機能では、AVOでのみ使用している入出力ハードウェアの故障照査を行う。照査の結果、入出力故障と判断された場合はAVO故障としてAVOに関する出力を全て遮断した上で他系に切り換えるが、AVPはそのまま制御を継続できるようなソフトウェア・ハードウェア構成としておりAVPに関する機能は失わずに制御を継続することができるようにしている。この関係を図10に示す。

このように、車上自動運転制御装置(AVP, AVO)の機能、ハードウェア、ソフトウェアの統合・一体化を行い、装置の小型・軽量化、機能のインテグレーション化が達成できた。

3.6 海外仕様・規格への適合

単車で無人自動運転する車両の基本的な性能・機能はプロトタイプ車両によって検証・確認された。しかしながら、商品化・量産化し市場へ投入するに当たり、個々の海外案件において個別の要求仕様や適用規格を満たさなければならない部分がある。先述のデザインや衝突安全性も今日海外案件で求められる特徴的なものであるが、ここではその他の例について述べる。

3.6.1 空調システム

シンガポールは熱帯性気候であり空調システムの性能・能力は不可欠な要件である。冷房能力は、定員105人の状態で外気条件 34 DB, 75% RHのもと常時0.175 m³/secの新鮮外気を取り入れながら車内を 26 DB, 60% RHに保つように32 kWとした。空調装置は、車両外観デザインに調和するように屋根に落とし込む薄型タイプを開発し2つのユニットが両車端部屋根部に装備されている。

空調システムの性能検証においては、空調装置単体の冷房能力試験に加え、社内の環境試験室で実車を用いシンガポールの環境条件(温度、湿度、日射等)を模擬した環境試験を実施した。なお、冷媒には代替フロンR407Cを採用し地球環境へ配慮している。

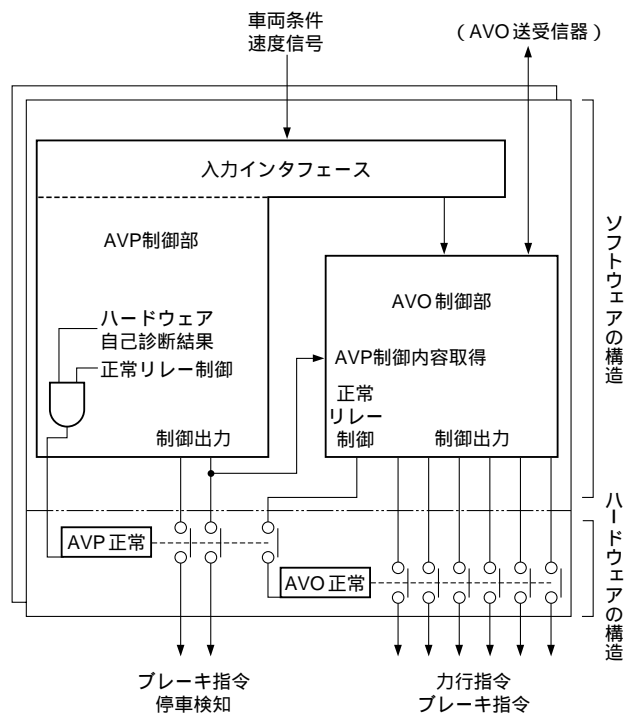


図10 AVPとAVOを一体化した機能構造

3.6.2 耐火性能

当然ながら車両には耐火性が求められ、特に海外ではその要求基準は厳しいものとなっている。本APM車両では、車体構造に対してNFPA130とその引用規格ASTMの遵守が求められた。特に床構造に対しては、ASTM E-119に基づき規定された燃焼温度パターンで床下より加熱・燃焼させた場合でも床面の平均温度上昇が15分間で139を超えないように規定されている。これに対し、床構造の下面に断熱材による断熱層を設け床上面への熱伝導を抑える構造を採用した。耐火性能は、実物大の床構造を製作し、それに対し第三者機関において燃焼試験を実施し検証した。このほか、内装材等の部品、材料についても耐火規格適合品を使用している。

3.6.3 前面貫通強度

海外案件向け車両では、車両前面への飛来物に対する強度が求められることも多くなっている。本APM車両では、車両速度の2倍の速度でBRB/RIA 20に規定される質量0.9 kg、一辺75 mmの中空鋼製立方体の角部が衝突した場合でも前面ガラス及び前面の構造物を貫通しないことが求められた。これに対し、前面ガラスには航空機の風防用ガラスを採用し、その他の前面構造物はFRP製とした。いずれも実物での検証試験を実施しその貫通性能を確認した。

3.6.4 EMC(電磁的両立性)

近年、電子機器がいろいろな目的のために使用されるようになりかつその回路の内容も複雑になってきたことにより、装置相互で電磁的な干渉を起こす機会が増加している。そのため、装置から電磁ノイズを出さない、また外来の電磁ノイズに装置が影響されない能力すなわち電磁的両立性(EMC: Electro Magnetic Compatibility)が求められるようになってきている。本APMシステムでは、EN規格への適合が要求された。これに対し、規格に基づき各車載機器単体

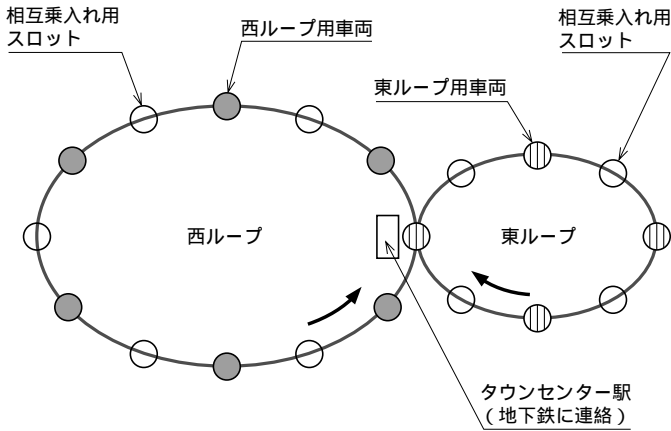


図11 合流部同期制御の概念

から車両全体さらには地上のサブシステムを含めたEMC試験を実施した。その結果、十分なEMC性能を有していることを確認している。

4. サブシステムの構築

4.1 運行管理システム

運行管理システムは、国内の新交通システムに準じている。本APMシステムの運行は図11に示すとおり、東西各々のループ線を内回り外回り走行する列車が地下鉄連絡駅（タウンセンター）に乗り入れるという特徴がある。これまでの鉄道及び新交通システムでは、タウンセンター駅に相当する駅には東西ループ線用の独立したプラットフォームを設け独立した路線運用をしている。しかしながら、本APMシステムでは周辺の都市開発の事状により高架軌道構造物をできる限り小さくする必要があった。そのため、タウンセンター駅には独立したプラットフォームを設けず同一のプラットフォームに東西のループの列車が相互に乗り入れできるように運行管理システムを構築した。

このような運行を行うためには、東ループ及び西ループに対し規定されている輸送量に基づく運転時隔を路線合流部で同期させる必要がある。これに対し図11に示す同期制御の概念を用いた。本同期制御は、客先要求上の最小運転時隔に列車をスロットと呼ばれる位置に配置しスロットの中間に相互乗り入れする反対側の路線のスロットを組み合わすものである。タウンセンター進入側の合流部では、最小運転時隔の1/2で運行制御を行うため合流部 - タウンセンター間の運行密度を上げる閉そく割り及び信号現示割付を行った。また、同区間での列車渋滞を防ぐため合流部手前の駅の列車出発タイミングを駅制御装置により調整する出発抑止機能も付加している。

4.2 電力システム

電力システムは、受電変電所にて22 kV、3相、50 Hzを上位変電所より受電しループ方式にて各駅に22 kVをそのまま配電する方式としている。各駅においては、構内変圧器にて22 kVを交流400/230 Vに降圧し、駅付帯設備に配電している。き電変電所は、車両基地、東ループ、西ループに1箇所ずつ配置している。各き電変電所には、整流器、インバー

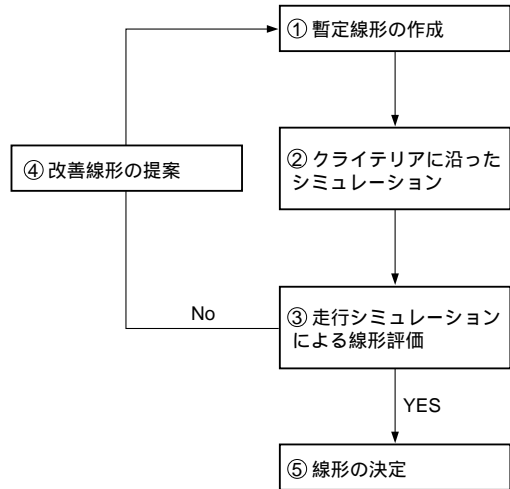


図12 線形の最適化ルーチン

タをそれぞれ1台ずつ設置し、直流750 Vとして車両に給電している。通常時には、車両基地、東ループ、西ループへはそれぞれのき電変電所より給電されるが、1つの変電所が給電停止した場合には、東ループと西ループの合流部に設置している開閉器を閉じることにより、相互の変電所より給電できるようにしてある。

4.3 軌道及び軌道付帯設備

4.3.1 線形計画

本APMシステムは、その導入地域が郊外のニュータウンであり、またループ線形状、立体交差を有しているため、曲線や縦断勾配を多用した複雑な線形計画が要求された。このため、建設コンサルタントによる都市計画の段階から積極的にシミュレーションを用いた独自の線形計画・修正案を立案し、線形上の制約からくる速度制限を最少化しスムーズな乗り心地を実現した。その手順を図12に示す。

- ① 暫定線形の作成（建設コンサルタントによる提案）。
- ② 線形クライテリア及び車両特性を織り込んだ走行シミュレーションによる線形の評価。
- ③ 線形の評価を行い、走行パターンより拘束条件となっている線形要素を抽出し、対象の線形要素を変更する。
- ④ 再度シミュレーションを行い、線形を再評価する。
- ⑤ 評価が良ければ線形を決定。

以上の5項目を各駅間に対して繰り返し、線形の最適化を図った。

4.3.2 軌道構造物

案内軌条は軌道両側に設置され、車両を側方からガイドしている。等間隔で保持金具によりH形鋼の案内軌条を保持している。

電車線は軌道の片方に設置され、DC750 Vを車両に給電している。電車線は共通のブラケットにより案内軌条とともに等間隔で保持されている。導電体はアルミニウムであり、またしゅう動面に耐磨耗性材質としてステンレスを採用している。

分岐器は本線上に16基、車両基地内に21基の計37基が設置され、すべて中央制御室より遠隔制御される。

また、メンテナンス時の作業車両の移動に必要な分岐器の

転換方向を表示するため、簡易型の灯火システム（ラインサイドシングル）を開発した。信号機の状態表示として停止、直進、左（右）のいずれかを1つの信号機で灯火することとした。その信号には、長寿命で玉切れがなく昼夜を問わず認識できる高輝度LEDを採用した。さらに、接点を共有しているため中央司令室からの信号に対して転換機の転換との同期が保証されている。

4.4 メンテナンス設備

車両基地はセンカン線に隣接し、地下鉄の車両基地二階部分の人工地盤上に設置されている。総面積は約3.5 ha、分岐器21基、緩衝器8基、6線ある検車線・重検線やメンテナンススペース、中央司令室を備えた2階建てメインビル、自動洗車装置、保線車庫、出庫検査場、留置試験線や受変電設備、さらにオーバーホールの後に行走試験を行う試験線も備えている。

4.5 RAMS

今日、海外向け交通システムの導入に際しては、そのシステムとしての信頼性、安全性を事前に評価することが技術的要件として求められる。本APMシステムでは、Reliability（信頼性）、Availability（稼働率）、Maintainability（保全性）、Safety（安全性）をからなるRAMSの解析を導入・実施した。このRAMSは大きくRAM（Reliability, Availability, Maintainability）とS（Safety）の部分に分けられる。

Reliability解析では、FMECA（Failure Mode Effect & Criticality Analysis：故障モード・影響解析）の解析手法を用いて、各LRU（Line Replaceable Unit：交換可能なユニット単位）のMTBF（Mean Time Between Failure：平均故障間隔）からシステム全体のMTBFを算出した。

Maintainability解析では、PMA（Preventive Maintenance Analysis：予防保全解析）とCMA（Corrective Maintenance Analysis：事後保全解析）の解析手法を用いて、各LRUのMTTR（Mean Time To Repair：平均修復時間）からシステム全体のMTTRを算出した。

Availability解析では、得られたシステム全体のMTBFとMTTRからAvailabilityを算出した。AvailabilityはMTBF/（MTBF + MTTR）で表わされる。そしてこの結果がAvailabilityの要求値、車両99.00%、信号99.98%、電力99.99%を満足していることを確認した。

Safetyの解析は、MIL-STD-882C及びDEF-STAN-0056の規格に基づいて実施した。

まず、システムにおいて起こり得る危険（ハザード）を列挙した。そして、各ハザードの発生頻度とそのハザードによる事故の被害の大きさを評価した。発生頻度及び被害の大き

さはその程度によりランク分けされ、発生頻度で6段階、被害の大きさで4段階にランク分けされている。発生頻度と被害の大きさのランクの組合せからリスクの程度が得られる。

次にランク分けされたリスクに対しSafety解析を実施した。Safety解析には、SSHA（Subsystem Hazard Analysis）、IHA（Interface Hazard Analysis）、OSHA（Operation & Maintenance Hazard Analysis）の3種類がある。SSHAは主に機器やユニットの故障によって起こるハザードを扱うものである。IHAはサブシステム間のインターフェースの故障、不具合によって起こるハザードを解析するもので、OSHAは運用、維持管理の作業において発生するハザードを対象としている。

このような手順と解析手法を用いて、SSHAで約1400項目、IHAで約800項目、OSHAで約700項目のハザードを解析・評価した。解析の過程において顕在化した高リスクのハザードに対しては適切な対策を施しリスクの低減も行った。その結果、システムとしてハザードのリスクは低減され、交通システムとして運用に支障のないことが確認された。

5.ま と め

2003年1月にシンガポールLTA向けAPMシステムのセンカン線が開業した。本報にAPM車両とそれを支えるサブシステムの概要を紹介した。今後お客様にCrystal Moverという名称とともに受け入れられ、都市内輸送システムとして所期の目的を達成することを強く願う次第である。

最後に、本APMシステムの完成に当たり、ご指導ご協力をいただいた関係各方面の方々に深く感謝の意を表します。



持留裕之
機械事業本部
プラント・交通システム
事業センター交通システム・機械技術部
車両・機械設計課



増川正久
機械事業本部
プラント・交通システム
事業センター交通システム・機械技術部
プロジェクトグループ長



鈴木康之
機械事業本部
プラント・交通システム
事業センター交通システム・機械技術部
システム制御設計課



柏誠
機械事業本部
プラント・交通システム
事業センター交通システム・機械技術部
交通システム設計課



貞光伸一
長崎造船所
艦艇部
電武装設計課



河野浩幸
技術本部
広島研究所
機械研究室