

# 新都市交通システム

## New Urban Transportation Systems

都市モノレールや新交通システムなどの新都市交通システムは、行き詰まった都市交通難を解決する一つ的手段として、現在未利用である街路の上空を利用し、大量かつ高速に旅客を輸送することを目的とし、加えて、建設費の低廉化をねらって開発された。現在各所で建設が推進されており、いよいよ本格的に隆盛期を迎えようとしている。

本稿では、都市モノレール第1号として開業をみた北九州市の都市モノレール小倉線のシステムとその特長について、また新交通システムでは、埼玉新都市交通株式会社・伊奈線、西武鉄道株式会社・山口線で、日立製作所が製作担当した設備についてその概要を述べる。

石川正和\* Masakazu Ishikawa  
 安藤正博\* Masahiro Ando  
 岡田博司\*\* Hiroshi Okada  
 小沢 勉\*\*\* Tsutomu Ozawa

### 1 緒 言

急速なモータリゼーション化に伴って、大都市の道路交通渋滞は日増しに悪化の一途をたどっており、交通事故、更には騒音、振動、日照、排気ガスなどの環境問題が深刻化している。この傾向は、地方都市でも例外ではない。

これらの問題を解決するため、現存街路の空間を利用して道路交通の補完的役割を果たし、都市交通の円滑化を図れるように、高架の専用軌道上に低騒音のゴムタイヤ車両を走行させる都市モノレールと新交通システム、いわゆる中量旅客輸送機関としての「新都市交通システム<sup>※</sup>」が開発され、調査、計画、建設が進められている。

特に、人口が100万人に満たない地方都市で、交通問題解決の手段として、中量旅客輸送機関の導入を検討している都市は数多い。

昭和47年に「都市モノレールの整備の促進に関する法律」が制定され、軌道構造物、駅などを道路の一部として国庫補

助する、いわゆるインフラ補助方式が確立され、急速に各都市で調査、計画、建設が進められるに至った。昭和60年度現在、事業化された路線は表1に示すとおりである。

また、調査の対象となっている都市は約40箇所に及んでいる。

更に、海外でも、各都市で調査、計画が進められている。

図1に北九州市の都市モノレール小倉線を、図2に西武鉄道株式会社・山口線を示す。なかでも、北九州市の都市モノレール小倉線は、本格的な中量旅客輸送機関の第1号であり、日立製作所はその建設に当たり、計画の初期段階から総合的に取り組み、まとめあげた。

以下、小倉線のシステム概要とその特徴、及び埼玉新都市交通株式会社・伊奈線、西武鉄道株式会社・山口線の中で、日立製作所が納入した設備の技術的特徴について述べる。

表1 新都市交通システムの事業化路線 昭和60年度現在、開業及び建設省で事業化が決定している路線一覧で、インフラ補助対象外路線も含まれている。

| 都 市 モ ノ レ ー ル |                                 |          |              |
|---------------|---------------------------------|----------|--------------|
| 北 九 州 市       | 小倉線(8.4km複線)                    | こ座形      | 昭和60年1月開業    |
| 千 葉 県         | 2号線(8.1km複線)                    | 懸垂形      | 昭和63年3月開業予定  |
| 大 阪 府         | 中央環状線(第1期6.7km複線)               | こ座形      | 昭和65年3月開業予定  |
| 沖 縄 県         | (仮称)空港・汀良線(14.3km複線, うち0.7km単線) | こ座形      | 昭和68年10月開業予定 |
| 東 京 都         | 多摩南北線(16km複線)                   | こ座形      | 昭和72年開業予定    |
| 新 交 通 シ ス テ ム |                                 |          |              |
| 神 戸 市         | ポートアイランド線(6.4km複線, うち3.5km単線)   | 側方案内式    | 昭和56年2月開業    |
| 大 阪 市         | 南港ポートタウン線(6.6km複線)              | 側方案内式    | 昭和56年3月開業    |
| 横 浜 市         | 金沢シーサイドライン線(10.9km複線)           | 標準形側方案内式 | 昭和63年開業予定    |
| 山 万 株 式 会 社*  | ユーカリヶ丘線(4.3km単線)                | 中央案内式    | 昭和58年9月開業    |
| 埼 玉 県*        | 伊奈線(11.7km複線, うち3.5km単線)        | 側方案内式    | 昭和58年12月開業   |
| 西武鉄道株式会社*     | 山口線(2.8km単線)                    | 標準形側方案内式 | 昭和60年4月開業    |

注：\*はインフラ補助対象外路線を示す。

※) 新都市交通システム：新交通システムの解釈は、モノレールなどを含めた広義の場合と、ゴムタイヤ方式の中量軌道輸送システムを指

す狭義の場合がある。この狭義の新交通システムと区別するため、新都市交通システムとした。

\* 日立製作所システム事業部 \*\* 日立製作所機電事業本部 \*\*\* 日立製作所水戸工場



図1 北九州市の都市モノレール小倉線 4両固定編成とし、1編成当たり1,078人の輸送量がある。

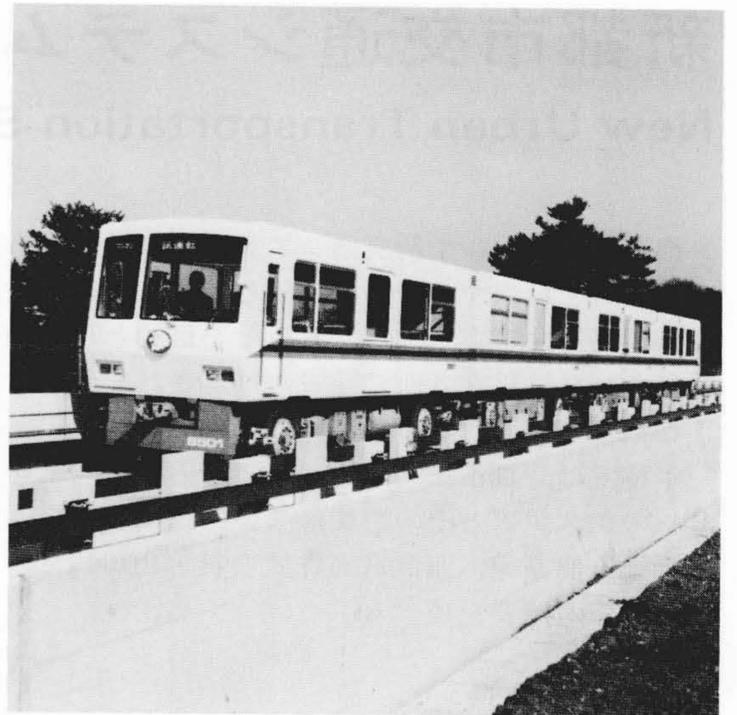


図2 西武鉄道株式会社・山口線 4両編成として、1編成当たり376人の輸送量がある。

## 2 都市モノレール——北九州市の都市モノレール小倉線

### 2.1 小倉線の概要

小倉線は、市の中心的繁華街である国鉄小倉駅前と、小倉南区企救丘の住宅街を結ぶ8.4kmの路線で、路線概要を表2に、軌道構造の概略を図3に示す。

### 2.2 小倉線の特徴

小倉線は、都市モノレールとして数々の新しい特徴を持っているが、その主なものを挙げれば次のとおりである。

#### 2.2.1 車両<sup>1)</sup>

##### (1) 輸送力の増大

ゴムタイヤの負担力の増加によって、従来1軸当たり10t(1軸に2輪)であった軸重を11tに増大し、床面の平坦化とあいまって、4両固定編成で最大乗車人員1,078人(立席面積割合0.1m<sup>2</sup>/人)の大量輸送を可能とした。

表2 小倉線路線概要 9編成(36両)が投入されている。

| 項目     | 概要                                     |
|--------|--|
| 路線長    | 8.4km(複線)                              |
| 駅数     | 12箇所(小倉～企救丘)                           |
| 形式     | こ座形モノレール(大形)                           |
| 分岐器    | 関節可とう式及び関節式                            |
| 輸送量    | 約7,000人/時間、ピーク時片道(昭和60年)               |
| 運転ヘッド  | 6分間隔                                   |
| 列車編成   | 1列車4両編成                                |
| 定員     | Mc: 114人, M: 125人, 478人/列車(標記定員)       |
| 満員     | Mc: 260人, M: 279人, 1,078人/列車           |
| 車両寸法   | 60,200×2,980×3,490(mm) (4両編成)          |
| 最高速度   | 80km/h                                 |
| 電圧     | DC1,500V                               |
| 変電所    | 2,000kW×3箇所、インバータ付き                    |
| 信号     | ATC(自動列車制御)方式、車内信号方式<br>TD(連続式列車検知)方式  |
| 通信     | 指令電話、業務用交換電話、列車無線、誘導無線                 |
| 車庫     | 1箇所                                    |
| 運転システム | 手動運転及びATO(自動列車運転)による自動運転、コンピュータによる運行管理 |

注：略語説明 Mc(乗務員室付き電動車), M(中間電動車)

##### (2) 乗り心地と環境改善

列車先頭部に大形曲面ガラスを用いて、都市の景観にマッチさせるとともに、ボルスタレス方式の空気ばねボギー台車により、乗り心地の改善を図り、更に、機器音の低減と音源周囲の吸音・遮音対策により、低騒音化〔10m側方、地上1.2m 70dB(A)目標〕を図った。

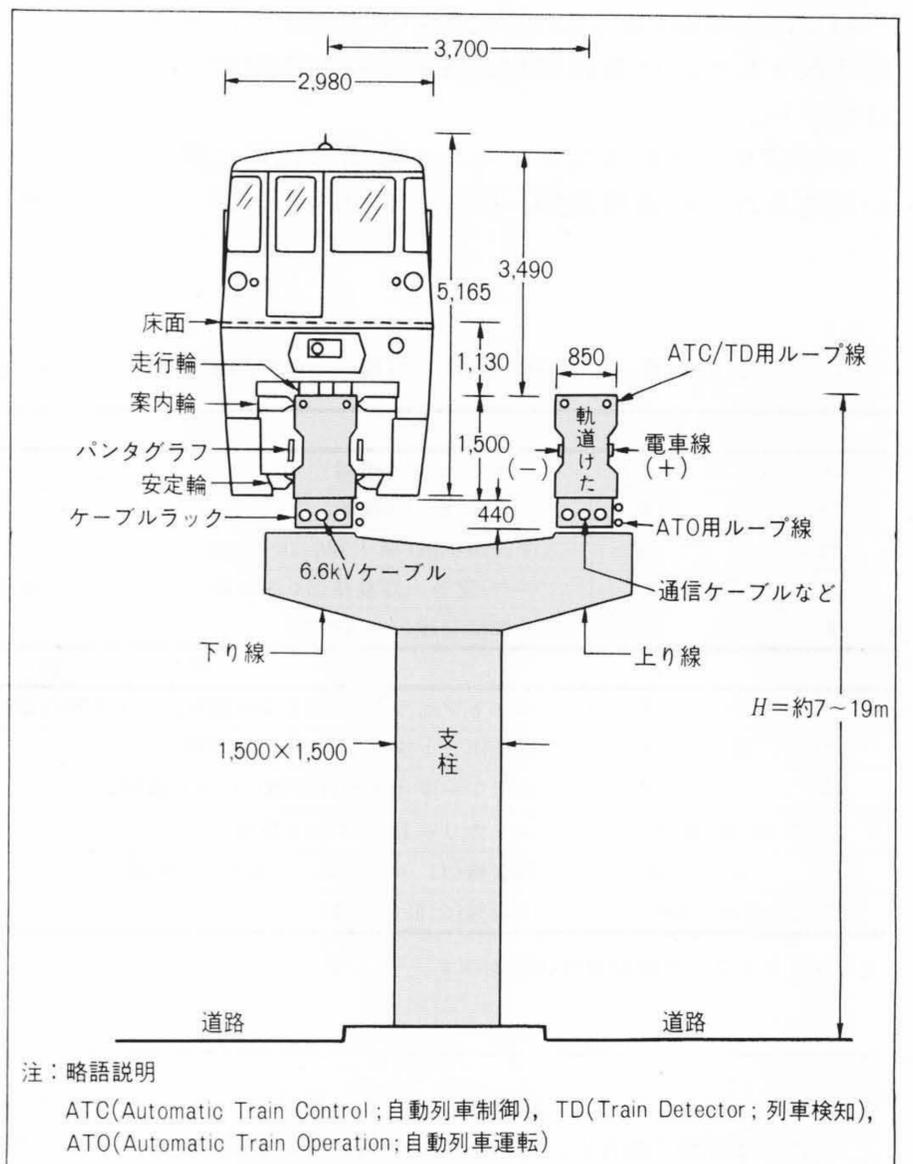


図3 軌道構造 T形鉄筋コンクリート製支柱の上に、プレストレストコンクリート軌道けたが架設され、その周りに電車線、信号線などが取り付けられている。

(3) 省エネルギー化

電機子チョップ制御方式を採用し、電力回生ブレーキにより、省エネルギー化を図った。また、ヒートポンプ式空調装置により電気暖房器を廃止し、省エネルギー化も行なった。

(4) 省力化

自動運転装置を採用して、1人乗務運転を行ない乗務員を低減するとともに、自動検査装置を導入して、保守面の省力化を図っている。

2.2.2 地上設備

(1) 新形電車線

電車線は、軌道けた側面に正・負2条が取り付けられており、その構造は、アルミT形架台とスズめつきスズ入り銅トロリによって構成されている。これにより、従来の導電鉄レールのさびの発生が防止され、都市美観上大幅な改善が図られた。

(2) 小形分岐装置

分岐装置は軌道構造の特殊性から、軌道けた全体を転換する方式としており、けた全体を曲げる可とう式と、けたを短く区分して折り曲げる関節式の2種類が用いられていたが、今回は分岐装置の小形化、乗り心地の向上、転換時分の短縮を図って、関節可とう式分岐装置が開発され実用化した。これは、けた本体は関節式とし、案内輪、安定輪の当たるガイド部分を可とう式としてスムーズな曲線を形成するものである。これを組み合わせて、渡り線分岐も開発された。

(3) 高信頼度列車連続検知装置

一般鉄道の列車検知は、軌道短絡方式によっているが、ゴムタイヤを使用している新都市交通システムでは、他の方法を取らざるをえない。このため、長い間高周波誘導によるチェックイン・チェックアウト方式が採用されてきたが、より保安度の高いシステムを目指して、小倉線では高周波誘導による連続検知方式を開発し採用した。これらの方式の原理比較を図4に示す。

(4) 省エネルギー用電力回生インバータ装置

車両から得られた回生電力を効率良く使用するために、変電所にサイリスタ・インバータ装置を設置して、回生電力を交流に変換して駅その他の付帯設備に供給し、省エネルギー効果を発揮している。

2.2.3 総合管理システムとATO(自動列車運転)システム

業務運営の能率化、省力化を図るため大幅にコンピュータシステムを取り入れ、併せて車上のATO(Automatic Train Operation: 自動列車運転)装置と連携をとった一人乗務運転を行なっている。

(1) 総合管理システム

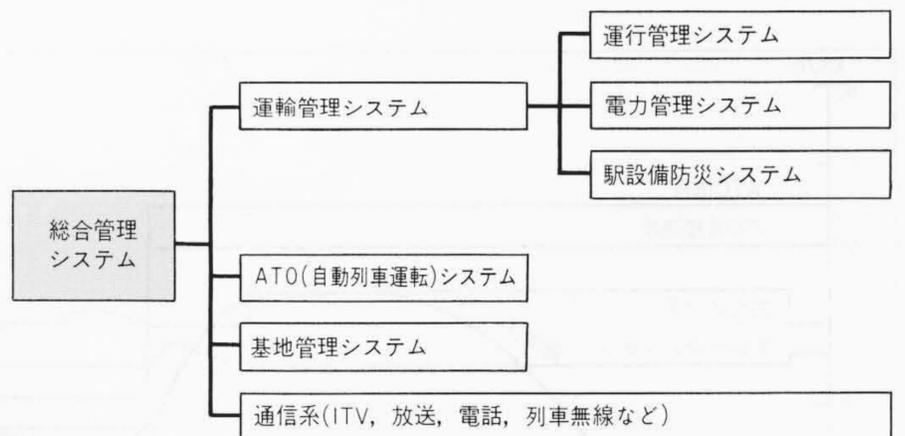
制御対象路線長8.4km、駅数12、変電所数3という中規模路線に対応したパフォーマンスの良い総合管理システムとした。このうち、運輸管理システムは光ファイバを採用した自律分散制御方式とし、運行管理、電力管理、駅設備・防災管理の3機能を一括して処理している(運輸管理システムについては、本誌の別稿「鉄道トータルシステムの展開」を参照)。

また、車上に設置したATO装置と誘導無線情報伝送系を介して情報を授受し、ATOシステムを構成して列車運転の自動化を行なっている。更に、ホーム監視テレビジョン(ITV)系のほか、放送系、電話系などの通信設備も合理的な管理、運営の手段として統一された思想に基づいて適切に配置した。また、空間波による列車無線系により、中央指令室と列車間の通話を行なうとともに異常発生時の非常系にも用いている。

本システムの機能・構成は図5に示すとおりである。

| 検知方式                      | モデル図 | 方式の概要   | 適用例など                               |
|---------------------------|------|---|-------------------------------------|
| (鉄レール)軌道短絡方式              |      | 送信器からのレール信号電流を鉄輪などによって短絡することにより受信器への入力遮断され、列車の存在を検知する。  | 従来の一般鉄道                             |
| (高周波誘導式) チェックイン・チェックアウト方式 |      | 走行面に設けられた検知ループ上を列車が通過する際、列車先頭からのfinによりfchを抑圧しイン情報とし、列車後尾からのfout信号の受信によりアウト情報として列車数をカウントする。                    | 羽田線モノレール・読売ランドモノレール・万国博モノレール・札幌市地下鉄 |
| 高周波誘導連続検知方式               |      | 先端からの微弱な照査信号fchを流した閉そく区間に、fchから強力な信号f1(もしくはf2)を発する列車が進入したとき、受信器でfchがf1(もしくはf2)により抑圧されて受信されないことによって列車の存在を検知する。 | 北九州モノレール・大阪南港ポートタウン線                |

図4 列車検知方式比較 ゴムタイヤ式のモノレールでは、鉄輪による軌道短絡方式にかえてチェックイン・チェックアウト方式が採用されてきた。この方式は点検知式であるため、小倉線では保安度の向上を目指して連続検知方式とした。



注: 略語説明 ITV(工業用テレビジョン)

図5 総合管理システム機能構成図 運輸管理・自動運転・基地管理の各サブシステムと通信系が互いに有機的連携をとって統一的な管理を行なう。

なお、車両基地にはHIDIC-08による自動試験装置を配し、合理的な検査を実施するとともに、車歴管理などの基地管理システムを行なっている。

(2) ATOシステム

モノレールのけた構造上、従来形のATO地上子を設置でき

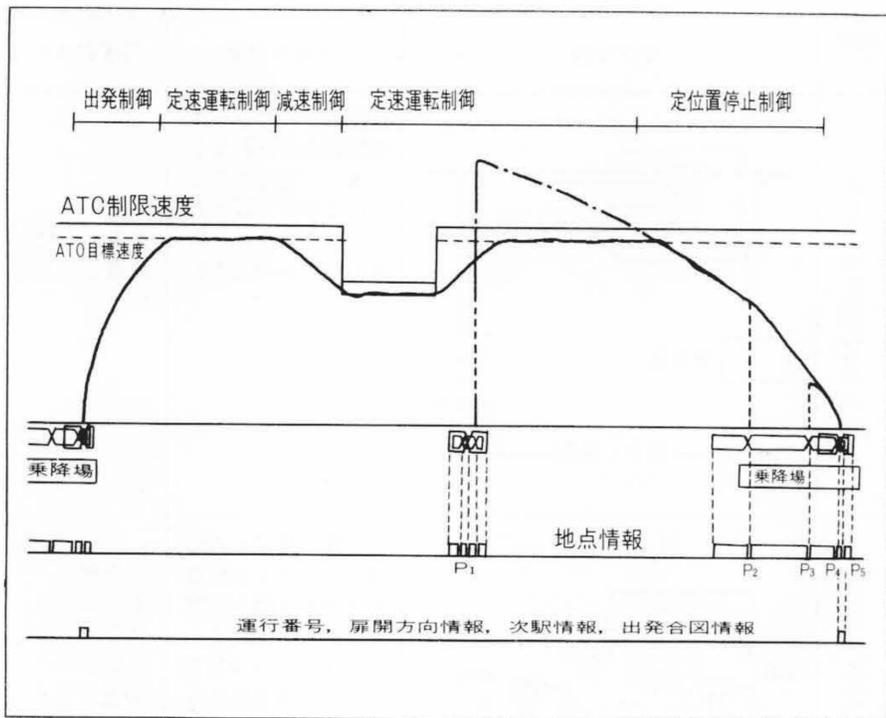


図6 ATO走行パターン 車上に搭載したATO装置は、地上の運行管理システムと誘導無線系を介して情報を授受し、出発から定位置停止までの制御をスムーズに行なう。

ないため、IR (Inductive Radio : 誘導無線)系を軌道けた下部に張り、それをねん架させることによりATO制御上の地点信号を発生させるとともに、駅部のループにより次駅情報、出発合図情報、扉開方向情報などを車上のATO装置に伝送している。車上のATO装置はこれらの情報を受け取り、定速運転、定位置停止などの運転制御、車内自動放送制御、扉開方向制御などを自動的に行ない、ワンマン運転に供している。

図6にATO走行パターンを示す。

#### 2.2.4 現地走行性能試験

小倉線の現地では、昭和59年7月から昭和59年12月までの6箇月間、加減速、走行抵抗、騒音・振動試験を含む車両走行性能試験、ユニット開放併結運転試験を含む車両制御性能試験、ATO性能試験、変電所試験、誘導無線伝送試験、運輸管理システム総合試験、列車無線試験などを実施した結果、所定の性能及び信頼性を確認した。

モノレール車内での床面の振動測定の結果をみると、乗り心地評価も良好であった。

また、図7にATO装置による駅間(志井駅→徳力嵐山口駅)の、定員乗車時での自動走行特性を示し、定点停止精度は±30cm以内を満足した。

なお、走行試験の初期の段階で、TD (Train Detector : 列車検知)装置にチョップ制御装置からの誘導障害が発生したが、車体と主回路間に雑音吸収回路を追加して、雑音の車両外への漏れを防ぐことにより解決することができた。また、TD装置も所定の性能を確保することができた。

### 3 新交通システム

#### 3.1 埼玉新都市交通株式会社・伊奈線の電力設備

##### 3.1.1 電力設備の概要

伊奈線は、東北・上越新幹線の建設を機会に周辺の伊奈地区沿線の発展を図るために、建設されたものである。路線は、複線8.3km、単線4.6km計12.9kmで、駅は13箇所設けられている。車両は、最高速度60km/hで、4両又は6両編成を3分間隔で運転可能である。電源は、東京電力株式会社から66kVで路線のほぼ中央1箇所で受電し、ここで6kVに降圧し、約1.7km間隔に設けられたき電変電所に給電している。このき電変電所で交流三相、600Vに降圧して、3本の電車線に給電している。

この600Vき電回路は、並列き電とし、電圧降下ができる限り小さくなるようにしている。この電力システムの決定には、大阪市・南港ポートタウン線で研究開発し実績のある低圧三相大電流き電回路の経験が取り入れられた。すなわち、車両の直流電動機をサイリスタ制御する方式を採用したため、力行・回生時に電流がひずみ、かつ高調波電流が発生し、その解析は困難とされていた。しかし、日立製作所で研究開発した低圧三相大電流き電回路用電力シミュレーションを実施し、その結果に基づき電力設備の仕様を決定した。

##### 3.1.2 電力設備<sup>2)</sup>の特徴

(1) 受電変電所は屋内式で、1万kVAの変圧器2台を設け、常用及び予備100%としている。

新幹線高架下を利用して変圧器を設置しているため、万一

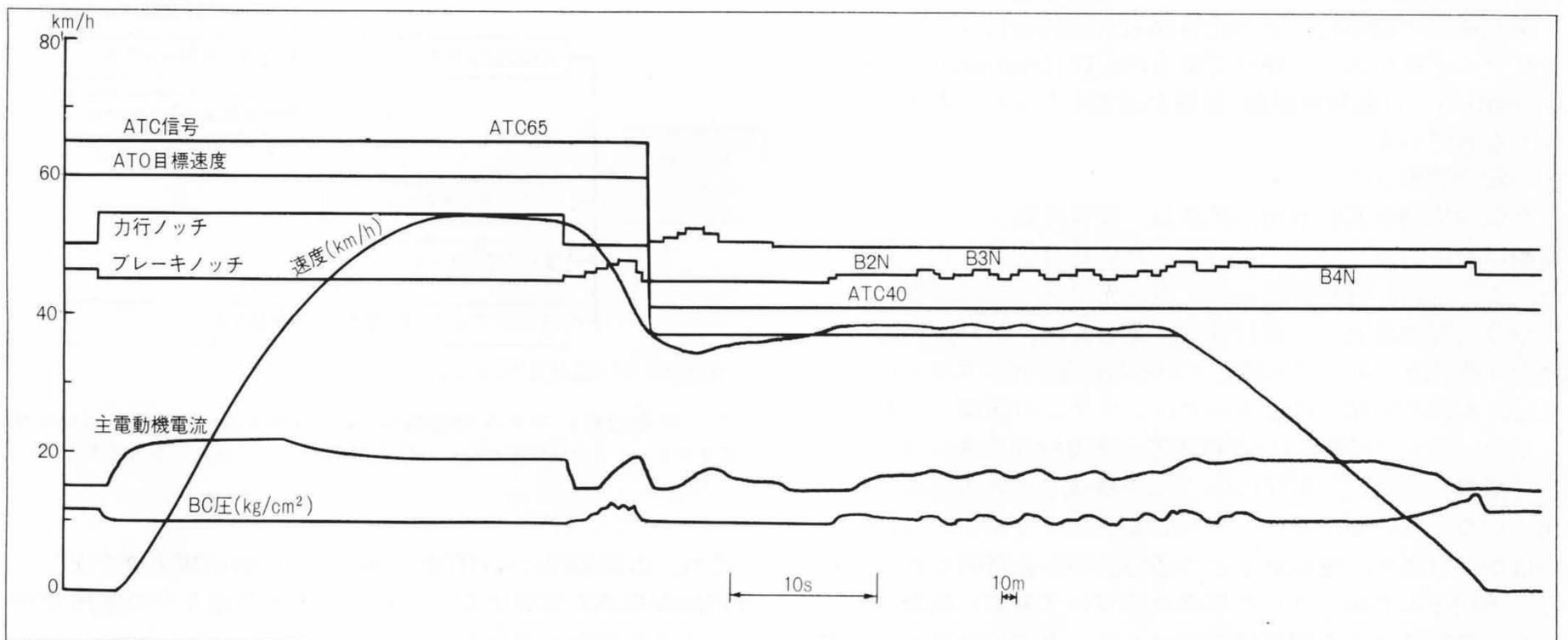


図7 ATO装置による自動走行特性 走行の途中で速度が低下しているのは、曲線による速度制限に対応してATO装置が自動的に減速制御を行なっているためである。

の火災でも上の新幹線に影響を与えないように、絶縁油を使用しないSF<sub>6</sub>ガス絶縁式を採用している。また、き電変電所も車両の負荷に応じて容量は1,000kVA, 1,500kVA, 2,000kVAの3種類とし、予備100%で、防火対策として乾式モールド絶縁式を採用している。

(2) 高調波電流を抑止するために、6.6kVの母線に5次, 7次の高調波フィルタを設け、このフィルタは力率を改善する効果をもっている。

(3) き電回路の単位長さ当たりのインピーダンスが従来に比較して大きいため、短絡位置によっては負荷電流と事故電流の区別ができない場合がある。したがって、近端短絡保護と遠端短絡保護の2段階のシステムにし、き電変電所間を連絡遮断装置で連絡し、短絡保護を実施している。

以上の電力給電システムを図8に示す。

### 3.2 西武鉄道株式会社・山口線の車両用VVVFインバータ

#### 3.2.1 VVVFインバータの概要

山口線は西武遊園地駅と西武球場前駅とを結び、路線は単線2.8kmで、車両は最高速度50km/h, 4両編成で運行されている。この山口線の新交通システムは、昭和58年3月に設定された「新交通システムの標準化と基本仕様」に準拠して設計・製作されたもので、標準化された仕様では国内で最初のシステムである。この標準化仕様では、電気方式が三相・600V交流方式から750V直流方式に変わり、山口線では750V直流方式が採用された。

この直流方式の採用により、車両の駆動方式は保守の大幅低減が可能となる交流三相誘導電動機を用いたVVVF(Variable Voltage Variable Frequency: 可変電圧・可変周波数)インバータの採用が可能となった。この駆動方式により、電力回生ブレーキによる省電力化が図られ、かつアップダウンとカーブの多い山口線での運転操作の簡易化のため、車両速度の一定制御を実現できた。

#### 3.2.2 VVVFインバータ<sup>3)</sup>の特徴

直流電気方式で、ゴムタイヤ車両にVVVFインバータと交流三相誘導電動機が採用されたのは国内で最初である。各車

表3 VVVFインバータの仕様 西武鉄道株式会社・山口線のゴムタイヤ車両に搭載している最大制御容量1,300kVA, VVVFインバータの仕様を示す。

| 項目       | 仕様   |
|----------|--|
| 電気方式     | DC750V                                     |
| 主電動機     | 三相かご形誘導電動機 4台<br>95kW, 550V, 130A,<br>43Hz |
| 加速度      | 3.5km/h/s                                  |
| 減速度      | 3.5km/h/s(常用最大)                            |
| 最高速度     | 50km/h                                     |
| 制御方式     | パルス幅変調<br>電圧形VVVFインバータ                     |
| 出力電圧     | 三相550V                                     |
| 最大制御容量   | 1,300kVA                                   |
| 出力周波数    | 2~80Hz                                     |
| スイッチング素子 | 2,500V, 2,000AのGTOサイリスタ                    |
| 制御電圧     | DC100V                                     |

注: 略語説明 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency: 可変電圧・可変周波数)  
GTO(Gate Turn Off)

両に1台ずつ交流三相誘導電動機が搭載され、VVVFインバータは2両分の交流三相誘導電動機2台を制御するユニットの2群から構成されている。表3にVVVFインバータの仕様を示す。

#### (1) ゴムタイヤ車輪径差の制御

ゴムタイヤの車輪径差は、ゴムタイヤの摩耗による変動のほか、荷重条件、走行時間によるタイヤ内空気温度、空気圧力などで変動する。ゴムタイヤ車輪の計算上の直径は1,018mmであるが、これに対する変動範囲は、2両内での径差で36mmとしている。他方、交流三相誘導電動機2台を1ユニットのVVVFインバータで制御する場合は、ゴムタイヤの車輪径に

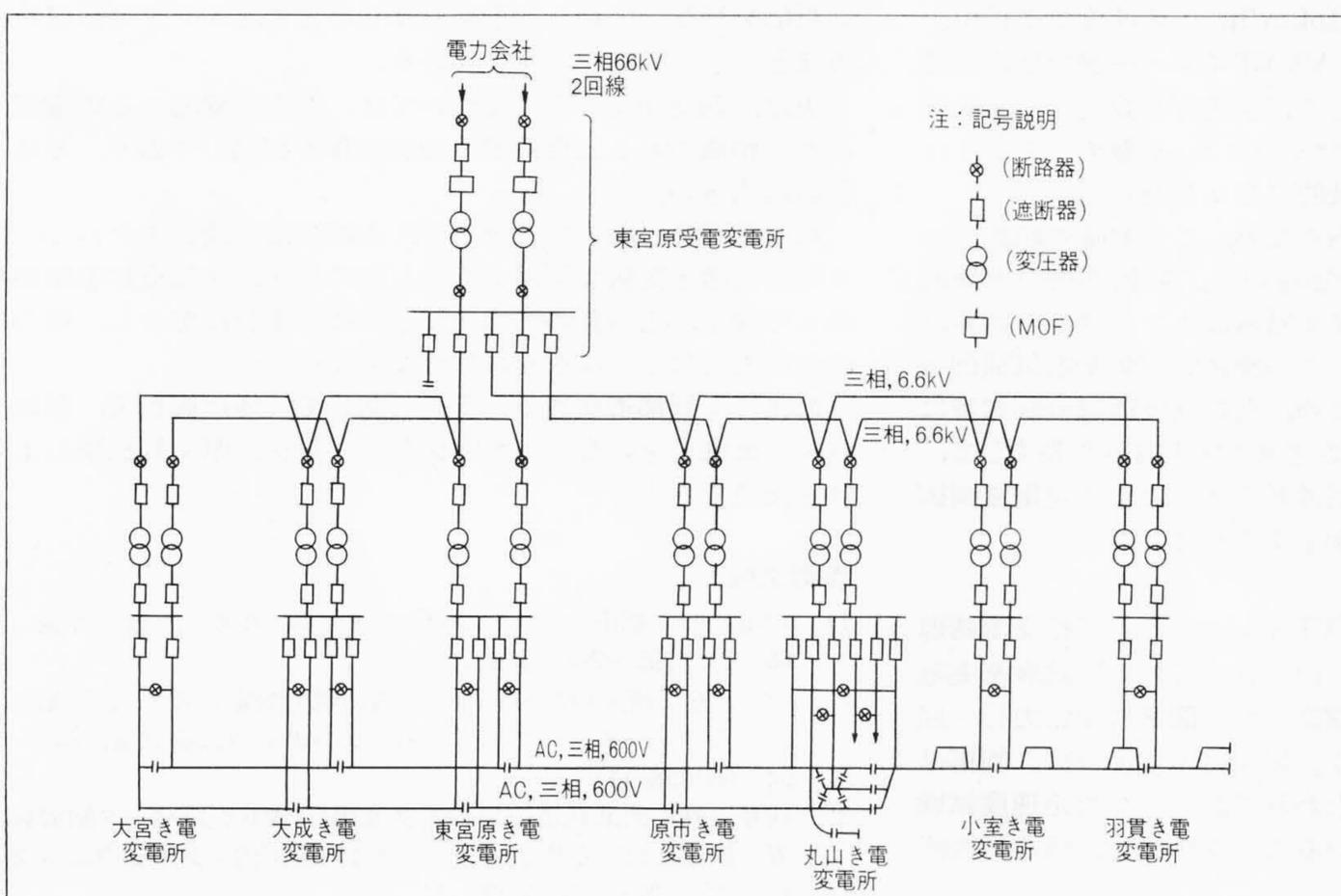


図8 電力給電システム 埼玉新都市交通株式会社・伊奈線の電力系統図で、受電変電所1箇所とき電変電所7箇所をもっている。

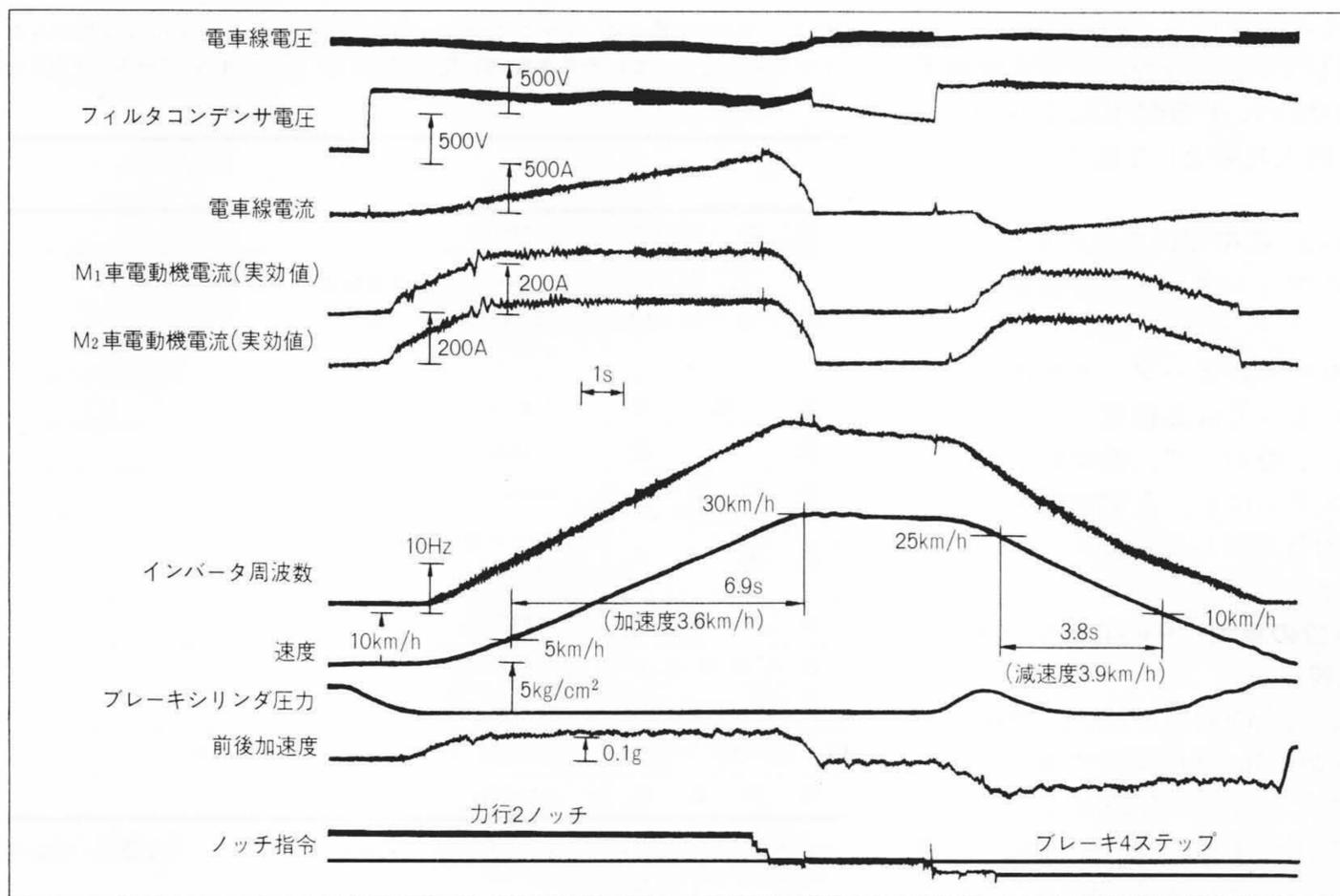


図9 定常力行・回生試験のオシログラム 西武鉄道株式会社・山口線での現車試験時の代表的なオシログラムを示すもので、所定の性能を円滑に制御する。

差があれば電動機の回転数に差が生じ、トルクにもアンバランスが生じる。このトルクに差が生じることは、電動機電流に差が生じ、車輪径の大きいほうの電動機の電流が多くなり、すなわち車輪径の大きいほうの電動機のRMS(自乗平方根)電流が小さいほうの電動機のRMS電流に比較して約15%大きくなる。したがって、交流三相誘導電動機出力容量の差も約15%の余裕をもたせている。

(2) 定速度運転と高加速度運転の制御

山口線の路線はこう配(最急こう配5%)、カーブ(最小曲線半径60m)があり、またゴムタイヤを駆動輪としているため走行抵抗が大きく、車両を定速度で運転することは難しい。そこで、運転操作の簡易化を図るために、マスタコントローラのハンドルに定速度ノッチを設け、定速度運転機能をもたせている。定速度運転の方法は、10km/h以上の速度で走行中、定速度ノッチが指令されると、VVVFインバータでは定速度ノッチ投入時の速度を基準にして目標速度を設定し、速度偏差に応じたトルク(引張り力、ブレーキ力)が発生するように電動機電流と滑り周波数を連続的に変化させる。

また駆動輪がゴムタイヤであるため、こう配時の起動、ユニットカット運転時のような加速時は、起動直後の出発抵抗の急変、電動機からゴムタイヤ踏み面までの弾性の影響により、機械的振動が発生する。この機械的振動が電気制御系に影響を与えないようにするため、高加速度運転の制御時には、電動機のロータから検出する速度の検出時間を長くして、速度を平均化するほか、滑り周波数の補正による定電流制御系をオープンにして安定な起動を実現している。

(3) 現車走行試験結果

ゴムタイヤの駆動輪で、VVVFインバータと三相交流誘導電動機を組み合わせた車両で、山口線で各種走行試験を実施し、インバータの制御性能を確認した。図9に定常力行・回生試験時のオシログラムを示す。同図に示すように、制御は全速度域にわたって円滑に行なわれており、また定速度試験でも円滑な制御が行なわれていることを確認し、所定の性能を満足した。

4 結 言

現在、北九州市の都市モノレール小倉線、埼玉新交通株式会社・伊奈線、西武鉄道株式会社・山口線とも順調に営業しており、市民の足として内外から注目を浴びている。

更に、都市モノレールは、小倉線の実績をベースに大阪府でインフラ部が建設中であり、沖縄県、東京都でも詳細計画が進められている。新交通システムについても、伊奈線、山口線などの経験を十分に生かして、横浜市金沢シーサイドライン線の建設が進行中であり、他に数箇所計画が進められている。

日立製作所は都市モノレールについては、計画の初期段階から建設、営業開始まで、一貫したシステムエンジニアリング対応を行っており、車両をはじめとするインフラ部以外のほとんどの製品を担当している。

更に、新交通システムについては、変電所機器、車両電気品など特徴のある設備機器の設計製作を担当しており、その使命は大きい。

都市計画の一環として進められる新都市交通システムは、市民の生活と密接な関係をもつものであり、今後更に都市美観との調和、建設費の低廉化などの技術革新に努力し、魅力のある乗物にしてゆかなければならない。

最後に、新都市交通システムに関して、種々御指導、御助言及び御協力をいただいた関係各位に対し、厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 岡田, 外: 都市モノレール小倉線モノレールカー, 日立評論, 63, 11, 795~798(昭56-11)
- 2) 桑原, 外: 埼玉新都市交通伊奈線の電力給電システム, 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 541~545(昭和58-11)
- 3) 新井, 外: 西武鉄道山口線新交通用VVVFインバータ制御装置, 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 22, 231~235(昭和60-11)