

高速・高密度運転に対応するATC/ATOシステム

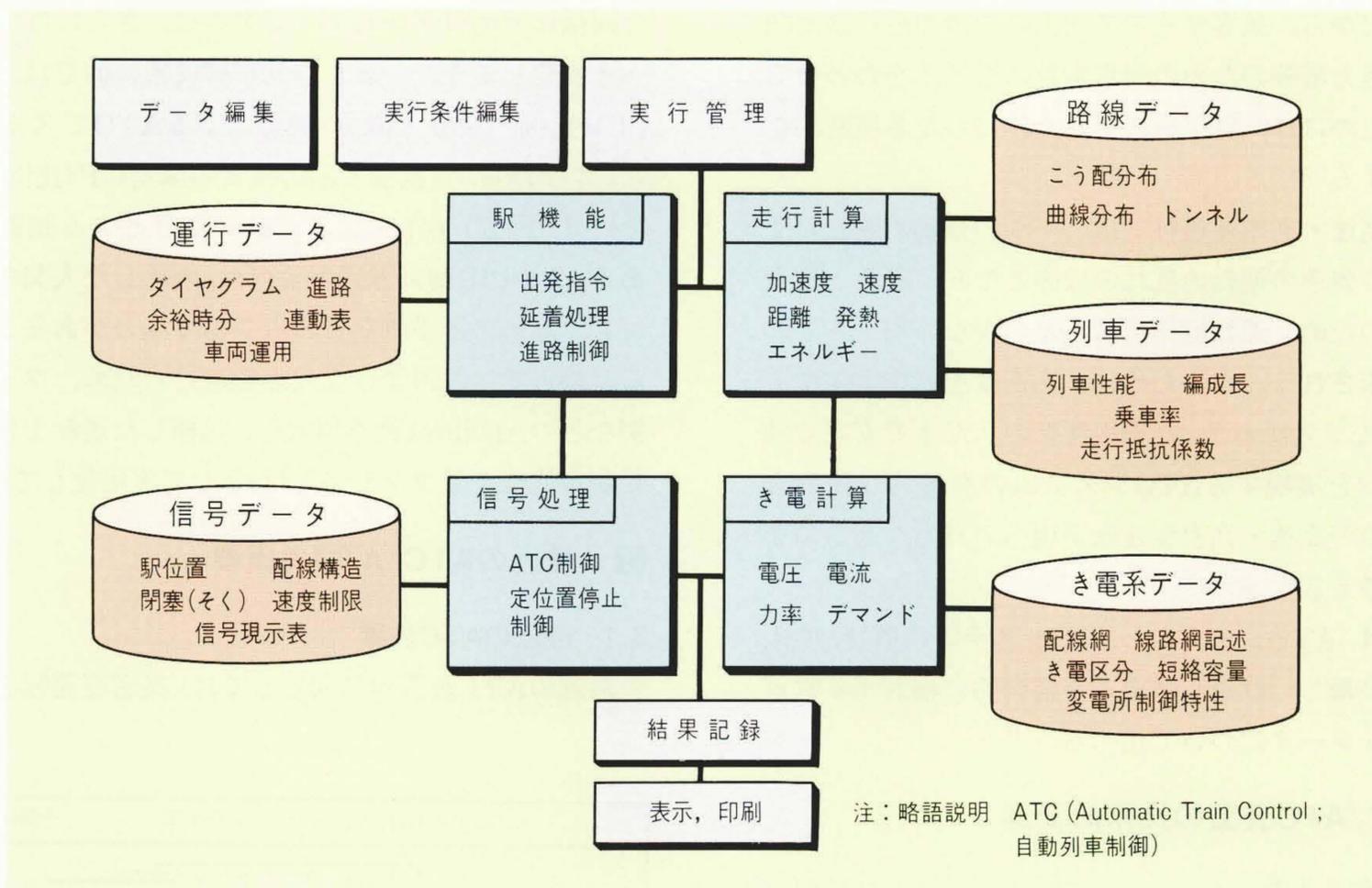
ATC and ATO Systems for High-Speed and High-Density Traffic Operation

高岡 征* *Tadashi Takaoka*

仲 吉隆** *Yoshitaka Naka*

関野真一** *Shin'ichi Sekino*

磯部栄介*** *Eisuke Isobe*



鉄道総合シミュレータ“New JUMPS” (New Justified Models for Practical Specification)のシステム構成
安全で効率的な新しい鉄道システム構築のためには、構成するサブシステムを有機的に結合させた総合的なシミュレーション検討が必要である。

安全で効率的な鉄道システムの実現に向けて、鉄道の高速化や高密度化が要請されている。この要請にこたえるためには、他サブシステムとともにATC (Automatic Train Control : 自動列車制御) システムやATO (Automatic Train Operation : 列車自動運転) システムの改善検討が必要である。従来もこれらのシステムは個別に性能の改善が行われてきたが、現在の輸送能力の限界に近い状況を打破するためには、双方を有機的に結合させ、しかも運行管理などの他の鉄道のサブシステムも考慮に入れた総合的な検討を要する。また、車両は新製車両を導入し

て逐次性能改善が比較的容易にできるが、車両性能向上の分だけシステム性能が向上する新しいシステムに再構築することが望ましい。

これらの状況を踏まえ、上述の要件を備えた新しい鉄道システムを総合的に検討するため、鉄道総合シミュレータ“New JUMPS” (New Justified Models for Practical Specification)を開発した。これにより、ATCシステムやATOシステム、さらには安全で効率的な新しい鉄道システムの開発を推進していく考えである。

* 日立製作所 水戸工場 工学博士・技術士(電気・電子部門) ** 日立製作所 水戸工場

*** 日立製作所 交通事業部 技術士(電気・電子部門)

1 はじめに

大都市の通勤線区や新幹線で、高速化・高密度化が要求されており、双方の同時達成が要求される場合も少なくない。通常、高速化と高密度化の達成は互いに相反する 경우가多く、高速化を図ると高密度化性能が低下し、逆に高密度化を図ると高速化性能は低下しやすい。このような状況から、旅客サービス向上のための運転速度向上と、輸送力増強のための列車本数の増加とを合わせて実現するためには、鉄道システム全体にわたる横断的な検討を要する^{1),2)}。

一方、高速・高密度運行では、一つの列車の運転の乱れが全体の列車の運転の乱れの原因となり、遅れが拡大する。そのため、運転操作に個人差の少ない均一さと即応性が要求される。このために、高密度運転を実現するためのATCシステムと、高密度運転の状況下で安定で効率的な運転を実現するATOシステムの有機的な組み合わせが今後の高速・高密度運転実現への有力な武器になるものと考え³⁾。

ここでは、ATCシステムとATOシステムの概要、導入例、および新しい鉄道システムを総合的に検討する鉄道総合シミュレータについて述べる。

2 ATC/ATO装置の技術的変遷

ATC装置やATS(Automatic Train Stop:自動列車停止)装置などの保安装置は、地上装置と車上装置で構成している。地上装置では、先行列車の存在を検知し、先行列車と後続列車の相対距離から後続列車の走行許容速度(ATC装置の場合)信号ないしは制動開始地点(ATS装置の場合)信号を車上装置に伝達する。車上装置では、受信した信号に対応した許容速度以下に列車速度を低下させる制御を行う。このように信号に対応した許容速度と列車速度との関係を照査し、ブレーキ指令を発する機能を速度照査機能と称し、保安制御車上装置の中心的な機能である。

ATC装置の技術的変遷は、図1に示すようにコントローラハードの面ではアナログ演算からデジタル演算へ、デジタル演算でも小規模集積回路から大規模集積回路やマイコン(マイクロコンピュータ)演算へと変化してきた。また、列車制御方式の面では、従来の段階制御主体の制御から、パターン制御や一段ブレーキ制御の方向に移行する傾向にある。

ATOシステムは1970年代に実用化された。ATO装置

の機能は大別して、駅間走行のための定速走行機能と駅停止のための定位置停止機能に分けることができる。定速運転機能はATC制限速度の数キロメートル毎時下位速度を目標速度として、次駅までの走行を自動化する技術である。一方、定位置停止機能は駅の定点に列車を停車させる機能で、停止精度の高さと乗り心地が良いことや停止時の減速度が大きいことが要求される。ATOもATCと同様にアナログからデジタルに、さらにはマイコンへと変化してきた。また自動制御技術の面では、当初はPID(比例・積分・微分)制御によるATOでスタートした。すなわち、目標値と制御値との偏差にP(比例)・I(積分)・D(微分)操作を加えて制御出力とする制御方式である。このPID制御方式の欠点は、熟練した人間の操作に対し、制御の上手さなどの点で劣る場合があることである。最近ではこのような欠点を避けるため、ファジィ制御などのAI制御技術を導入し、熟練した運転士に近い運転が可能な予見ファジィATOとして実用化している。

3 最近のATC/ATOの概要

3.1 最近のATC装置

最近のATC装置の動向としては、高密度運転を目的と

		1970年	1980年	1990年
システムへのニーズ		保安度向上	自動化省力化	保守性 経済性 高速度 高密度
要素技術	コントローラハード	アナログ回路	デジタル回路	8ビットマイコン 16ビットマイコン 32ビットマイコン 大規模集積回路
	制御技術	PID制御	サンプル値制御	適応制御 AI制御(ファジィ, ニューロ)
装置	ATC	アナログATC	デジタルATC	カスタムLSI ATC マイコンATC
	ATO		PID式ATO	ファジィATO

注：略語説明

マイコン(マイクロコンピュータ), PID(比例・積分・微分)

ATO(Automatic Train Operation: 列車自動運転)

図1 ATC/ATO技術の変遷 ATCはアナログ演算からデジタル演算, マイコン演算へ, ATOはPID制御からファジィ制御へと変化している。

した多段階一段ブレーキ制御のための多段階速度照査や装置の小型化、さらには自動試験機能の充実による検収業務の簡易化などが特徴的である。

3.1.1 東京急行電鉄株式会社納め一段制御ATC装置

東京急行電鉄株式会社では、田園都市線・新玉川線の輸送力増強および保安度の向上を目的とし、新しいATCシステム⁴⁾によって平成3年3月から運転を開始した。この新しいATCシステムは、多くの特徴を持っているが、最大の特徴は一段ブレーキ制御方式の導入である。

この一段ブレーキ制御方式は、既存の信号保安システム設備をできるだけ活用できて、しかも稼働中の営業路線でのシステム変更が比較的容易であるという特徴を持った、高密度化対応の運転保安システムである。

このような一段ブレーキ制御を実現するために、このシステムは22種類の信号段を持っている。運転士への表示として、22段の信号情報を表示し、前方信号が低位現示の場合には速度計内の前方予告表灯を点滅するとともに、予告ブザーを鳴動させて乗務員の操作を支援し、早めのブレーキ操作による円滑な運転ができる。

このような車上制御の基本となる速度照査・制御部は、16ビットマイコンと豊富な実績を持つATCカスタムLSIとを組み合わせた、リング演算照合型フェイルセーフマイコンによって構成され、機能の大幅な増加にもかかわらず小型化を実現した。ATC装置の外観を図2に示す。

3.1.2 209系車両用ATC装置

京浜東北線を走行する209系車両用ATC装置⁵⁾は、受信部二重系、制御部二重系の構成であり、受信部と制御部間の信号受渡しを周波数インタフェースとして継電器を省き、装置の小型・軽量化を図った。また、ATC装置の試験を自動で行う検査部を付属しており、制御伝送装置

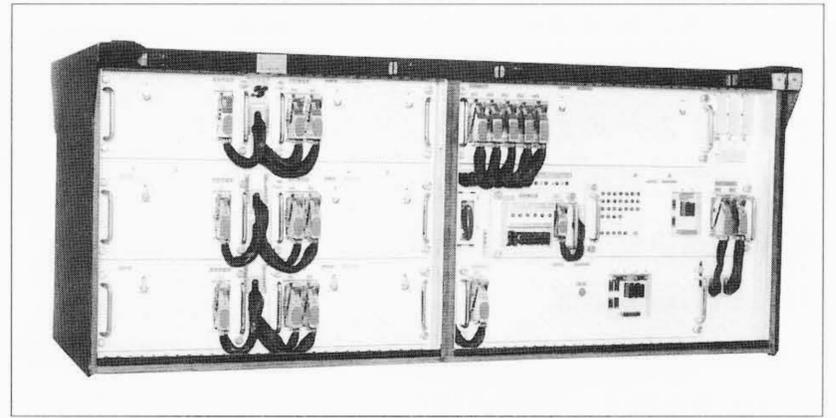
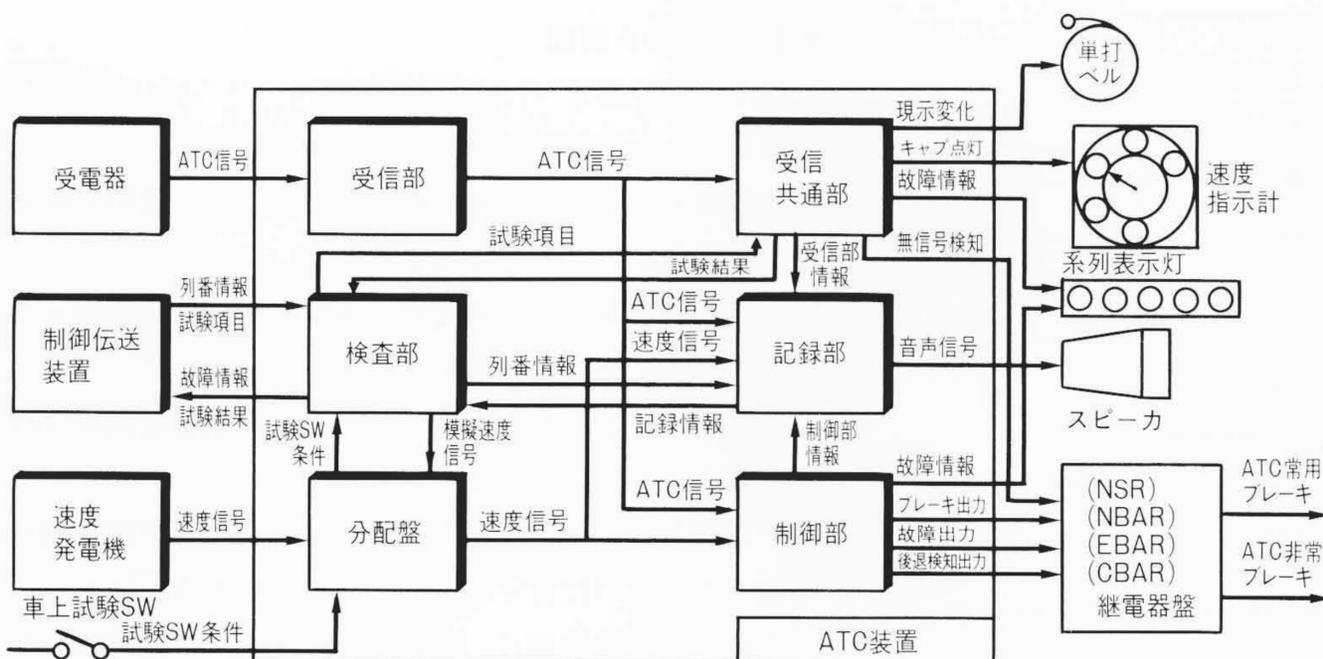


図2 ATC装置外観 機能は従来の7情報から22情報に大幅に向上したが、外形は小型化された。

からの車上試験指令に基づき、試験項目を自動的に設定指示し、試験結果を分析して合否の判定を自動的に行うことにより、検収業務の簡易化を図った。このATC装置の構成を図3に示す。ATC装置は受信部(二重系)、受信共通部、制御部(二重系)、分配盤、記録部および検査部で構成している。各部相互のインタフェースは、受信部と制御部間は周波数インタフェースとして、フェイルセーフ性能を重視した方式とし、検査部と各部間はカレントループでの直列データ伝送として、効率化と簡易化を図った。また、制御部の照査・演算制御回路は、16ビットマイコンと豊富な実績を持つATCカスタムLSIとを組み合わせたリング演算照合型フェイルセーフマイコン⁶⁾で構成した。

3.2 最近のATO装置

従来のATO装置は、ATC制限速度に忠実に追従した運転を行う場合が多かった。最近では、路線データを記憶したり、トランスポンダ導入による多情報化などによって、よりきめの細かい制御を行うようになっている。



注：略語説明
 SW (Switch)
 NSR, XR (無信号検知リレー)
 NBAR (常用ブレーキ指令リレー)
 EBAR (非常ブレーキ指令リレー)
 CBAR (後退検)

図3 209系車両用ATC装置の構成 制御伝送装置からの車上試験指令により、仕業・交番検査を自動的に行う。

3.2.1 東京都交通局向けATC/ATO装置

東京都営地下鉄12号線12000系車両には、ワンマン運転を支援するためのATOシステムが搭載されている。ATO装置は信頼性向上の観点から二重系化されている。ATO装置の主な諸元を以下に述べる。

(1) ATO送受信部

駅部に敷設した誘導ループを用いて、地点検知および情報伝送を行う。地点の種別はループを経由し、伝送する2,400ビット/sのデータ伝送で行い、地点の判別はループ撚(ねん)架点のレベル変化を検知して行う。また、駅停止位置のループでは、駅名、行先、列車番号などの情報を伝送する。

(2) ATO制御部

ATOの制御は、運転士の出発押しボタン操作によって起動し、駅間はATC制限速度の+3 km/h~-5 km/hの速度範囲で列車を走行させ、次駅の定位置に停車させるまでの一連の運転操作を自動化する。ATOには予見ファジィ制御を導入しているが、これと駅間の路線データの記憶とを合わせ、きめ細かく乗り心地の良い運転制御を実現している。

3.2.2 名古屋市交通局向けATO装置

名古屋市営地下鉄6号線は、平成元年に中村区役所~今池間を開業したが、今回今池~野並間の延長開業にあたり、ワンマン運転のためのATO装置⁸⁾を設備した6000形車両が導入された。地上設備を図4に示す。地上子には多情報が伝送可能なトランスポンダを使用し、停止駅ごとに4個の地上子を設置している。ATO地上子の種別と用途を表1に示す。

車上装置の構成を図5に示す。ATO装置は片側の運転

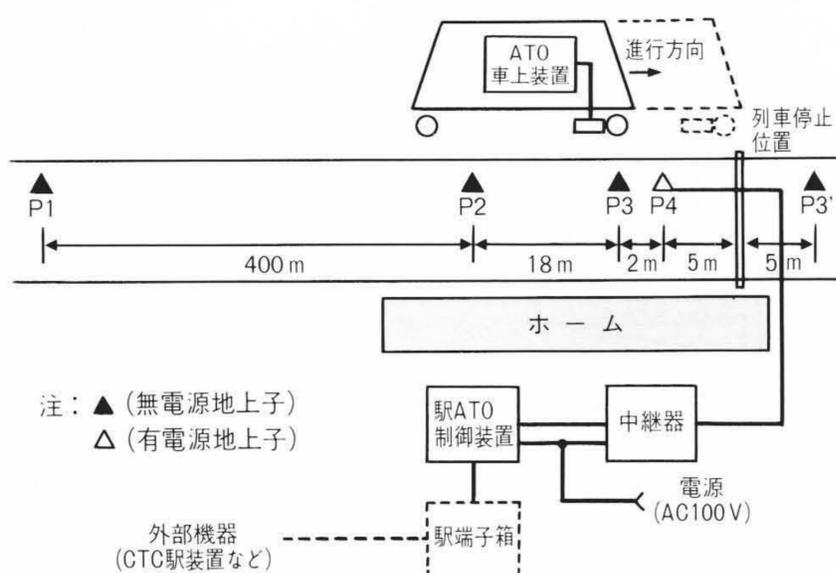


図4 ATO地上設備 地上子は停止駅ごとに4個設置され、多情報の伝送が可能なトランスポンダが使用されている。

表1 ATO地上子の種別と用途 第4地上子は有電源地上子とし、可変情報の伝送が可能である。

伝送方向	変調周波数	地上子種別	情報内容
地上→車上	1,708 ± 32 kHz	第1地上子 (P1)	地点種別(定位置停止制御用)
		第2地上子 (P2)	地点種別(定位置停止制御用)
		第3地上子 (P3)	地点種別(転動防止用) 駅コード(路線位置認識用)
		第4地上子 (P4)	地点種別(定位置停止確認用) 運転モード(運転パターン切替用)
		発駅地上子 (P3')	駅コード(路線位置認識用)
車上→地上	275 kHz無変調	無電源地上子 (P1, P2, P3, P4)	無電源地上子駆動用電力波
	3,000 ± 32 kHz	第4地上子 (P4)	進行方向など将来対応

室に設置され、予見ファジィ制御方式によって滑らかで効率的な運転を実現する。

4 鉄道システム総合シミュレータ

経済的で効率的な鉄道システムの実現に向けて、与えられた課題は数多い。その一つが高速化や高密度化であり、列車運行の高信頼化や省エネルギーなども重要な解決しなければならない課題である。これらの要求を満たすためには、一つのサブシステムの機能や性能の向上だけでは不十分であり、鉄道システムの総合的なシミュレータによって検討する必要がある。このような観点から、鉄道の運転制御の面を中心とした鉄道総合シミュレータ“New JUMPS”⁹⁾(New Justified Models for Practical Specification)を開発した。

4.1 システム構成

“New JUMPS”のシステムを27ページの図に示す。シミュレーションは以下に示す各部が分担する。

- (1) 駅機能部：退避、追い越し、折り返しの運用や停車時分、出発時刻などを管理する。
- (2) 走行計算部：駆動系走行、運転操作、信号に従った保安制御など車上の機能を実行する。
- (3) 信号処理部：地上側信号制御、進路制御を実際の線路配置と連動論理に従って実行する。
- (4) き電計算部：き電系各部を詳細に表現し、時々刻々の個々の列車の位置と電気的狀態を反映する。

これらの各計算部に、路線、列車、き電系、運行および

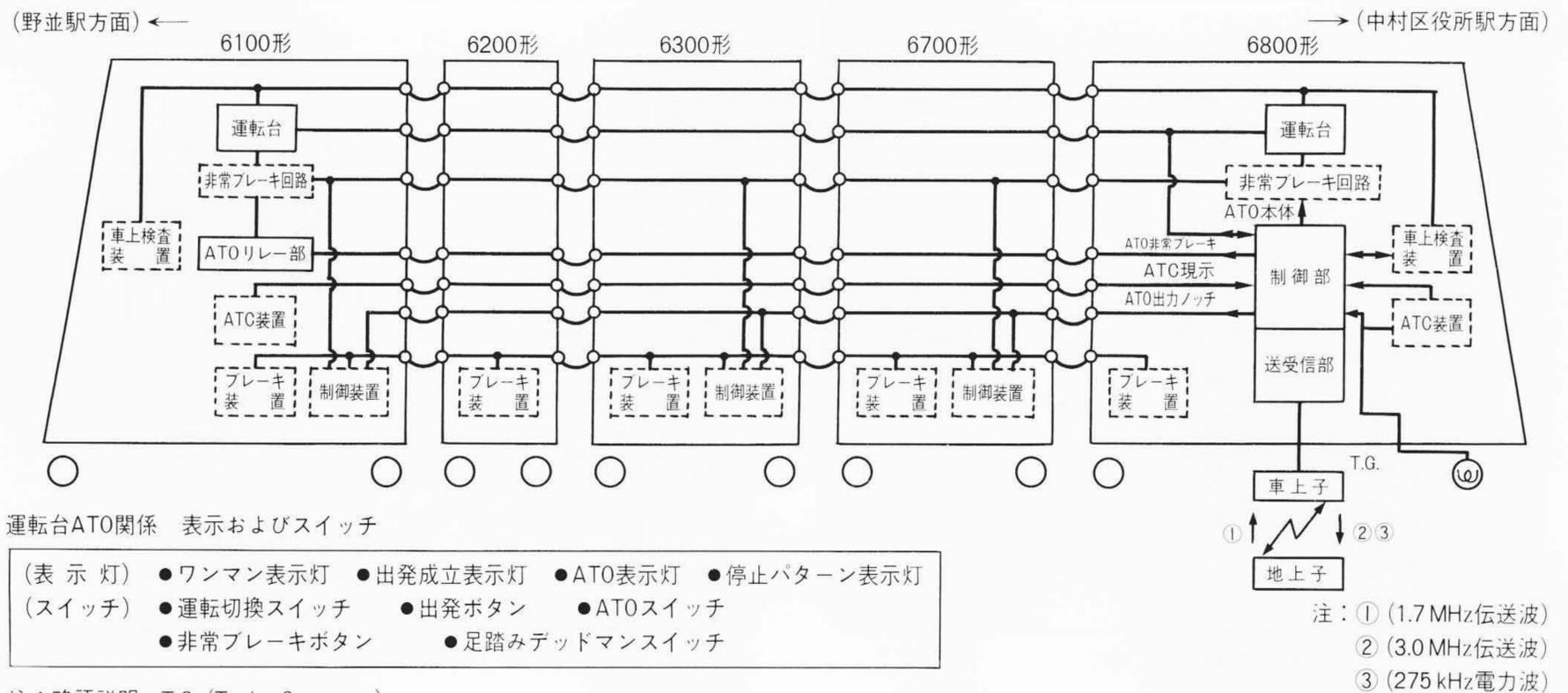


図5 ATO車上設備 予見ファジィ制御方式によるATO装置が、1セット搭載されている。

信号の各データブロックからシミュレーションデータが供給される。全体の動作は実行管理部によって制御される。

4.2 シミュレータの特徴

“New JUMPS”の主な特徴を以下に述べる。

(1) 車両の記述：現用されている主な電気車駆動方式（カム軸抵抗制御車，チョップ制御車，インバータ制御車）のモデルを組み込み，同一線区上を異なる複数車種が混在して走行できる。また，パンタグラフ点電圧は固定値と詳細なき電回路計算のいずれかを選択できる。信号方式も，ウェイサイド信号とキャブシグナルの選択や，保安制御方式の選択も可能である。

(2) 線路条件：走行に関する全条件（こう配，曲線，列車抵抗）と速度制限条件（曲線，こう配，分岐器，臨時速度制限）が設定できる。

(3) 信号制御・進路制御：列車の在線検知と後続列車への信号現示展開を行う。また，転てつ器や軌道回路を含む接続関係を詳細に記述できるので，各列車ごとの進路設定が可能である。

(4) き電設備モデル

実際のき電系統の詳細な配線接続関係と回路定数，複数の変電所の設置場所および負荷・回生特性，オンオフ条件などの特性を記述できる。したがって，他の系（列車，運行管理機能）と連携した省エネルギー制御方式のシミュレーションが可能である。

(5) ダイヤ（ダイヤグラム）の設定：各列車ごとの到着予

定時刻，出発予定時刻，最小停車時分，着発番線，進行方向，運用種別などが設定できる。また，列車群走行による乱れ発生，回復状況の検討や交差支障時分，折り返し支障時分，き電計算などが出力される。

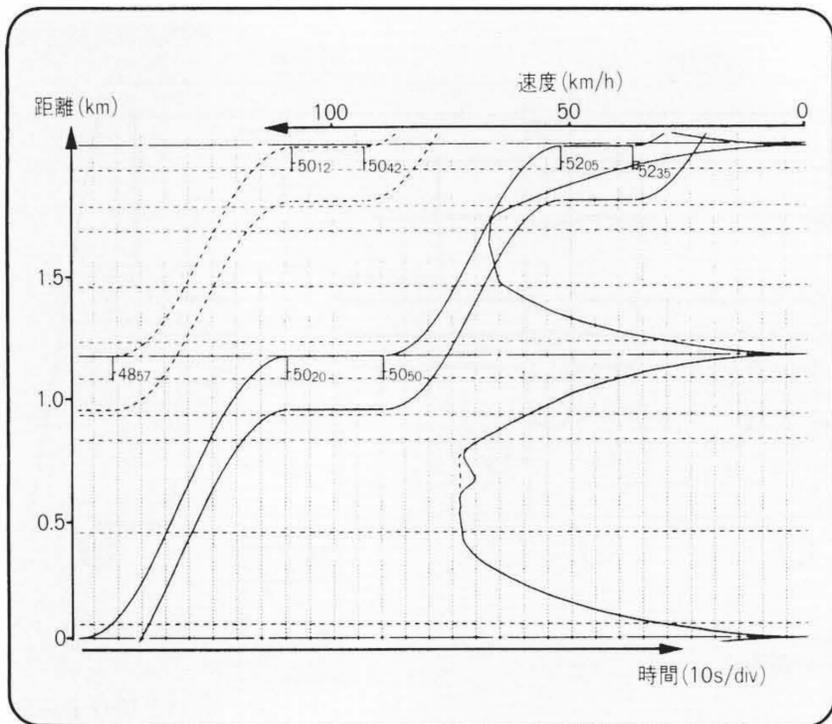
以上に述べたようなシミュレータの開発により，ATCやATOの単独の性能だけでなく，他の主要サブシステムと有機的に結合させた，実路線への適用をイメージしたシミュレーションが可能になった。

時隔曲線の出力例とき電計算出力例を図6に示す。

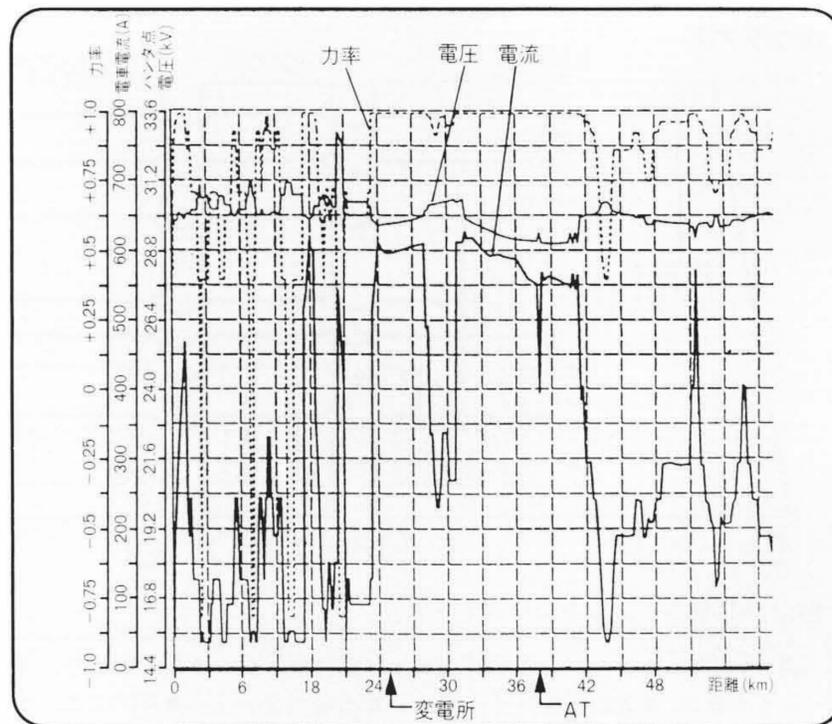
5 今後の動向

ATCシステムは安全の確保に，また，ATOシステムは省力化や均一の運転の実現にそれぞれ大きく貢献してきた。しかし，鉄道に対する最も強いニーズの一つである高速・高密度運転の実現のためには，従来のATCシステムとATOシステムの性能向上が不可欠である。高速・高密度運転を実現すると，単位時間内に走行する列車本数と走行距離が増加する。現実の運転では，これに外乱が加わると，列車群としての正常運転の確実性が低下しやすく，いったんダイヤが乱れると，この乱れが拡大されやすく，正常運転になかなか復帰できない。この傾向は高速・高密度化の度合いが増すほど顕著となる。

この解決のためには，地上システムの情報化とともに車上システムの情報化を図り，双方を移動体通信を介して結合し，列車群に対応した運転制御や運転整理が必要



(a) 時隔曲線の出力例



(b) き電計算の出力例 (電車側)

図6 “New JUMPS” 出力例 列車や信号さらにはき電系を含めた総合的なシミュレーションが可能である。

である。車上では、前方列車情報などを地上システムから受信して、乱れを拡大しないように各列車レベルで対応し、小さな乱れの範囲の回復力については、従来のシステムレベル以上の回復力を維持する。

このため、高速・高密度運転に対応するATOシステムとして、逐次変化する目標点(位置、時刻、速度)に対し列車の追従制御を行う目標点移動形のA-ATOシステム¹⁰⁾を提案する。このA-ATOシステムは、先行列車などの列車群の状況に対応し、最適な目標点を作り出して運転士の運転支援をする最適運転支援装置、目標点への列車の追従制御を行うA-ATO装置、および短い時隔の運転を可能とするA-ATC装置²⁾の3階層のシステムで構成

成する。このように地上・車上のサブシステムを有機的に結合させることにより、安全性などの鉄道の優れた特性を確保したうえで、高速化と高密度化の同時達成が実現できると考える。

6 おわりに

以上、ATC/ATOの技術的変遷と最近の実用システムの概要、今後の動向について述べた。安全で効率的な鉄道システム実現のためには、ATC/ATO以外のサブシステムも含む総合的な検討を要する。このような状況から、鉄道総合シミュレータ“New JUMPS”を活用し、新しい鉄道システムの開発に積極的に取り組む考えである。

参考文献

- 1) 高岡, 外: 鉄道における高速・高密度運転システム, 日立評論, 73, 3, 267~272(平3-3)
- 2) 高岡, 塚本: 車上パターン制御ATCによる高速・高密度運転方式の提案, 電気学会論文誌D, Vol.112-D, No. 8, 712~721(1992)
- 3) 高岡, 松丸: 列車運転・運行システム, 電気学会雑誌, 110, 4, 257~262(1990)
- 4) 村本: 東急田園都市線・新玉川線のATCシステム, 鉄道と電気技術, 15~24, Vol.1, No.1(1990)
- 5) 前川, 外: JR東日本901系用ATC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第29回, 322~325(1992)
- 6) 高岡: 逐次拡大チェック方式によるフェイルセーフなデジタル演算方式の開発, 電子情報通信学会論文誌A, Vol.J75-A, No. 6, 1080~1089(1992)
- 7) 安信, 外: ファジー制御による列車定位置停止制御, 計測自動制御学会論文集, 19, 11, 873~880(1983)
- 8) 大須賀, 外: 名古屋市交通局6000形車両用ATO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第30回, 428~432(1993)
- 9) 門馬, 外: 鉄道総合シミュレータNew Jumps, 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム第30回, 211~215(1993)
- 10) 村田, 外: 高密度運転対応列車群制御方式, 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム第30回, 216~220(1993)