

# 地下鉄向け自動列車運転システム

## Automatic Train Operation System for Subway Trains

大矢 純子      射場 智      中澤 弘二

■ OHYA Junko      ■ IBA Satoshi      ■ NAKAZAWA Hiroji

自動列車運転 (ATO : Automatic Train Operation) システムは、列車の運転を運転士に代わり自動で行うもので、近年、運行ダイヤの高密度化やホームドアの導入により、走行時間の安定や駅での正確な定位置停止を目的に、多くの鉄道会社で導入が進められている。

2008年6月開業の東京地下鉄 (株) 副都心線に乗り入れる東武鉄道 (株) の車両に、東芝で初めてのATO装置が採用された。当社が開発したATO装置は、走行時間を守り省エネルギーも考慮した走行計画を算出し、これに従って列車の運転を行う。駅停車時には予測に基づく制御を行い、ブレーキ段数の少ない既存車でも乗りごちを損なうことなく、高い精度で所定位置に停車させる。

In recent years, automatic train operation (ATO) systems that can operate trains automatically in place of the drivers have been introduced by many railway companies, in order to ensure that train operations are maintained according to the timetable and that trains stop exactly at the platform safety doors installed at each station.

Toshiba installed its first ATO system for rolling stock of Tobu Railway Co., Ltd., whose services have been extended to through-operation on the Tokyo Metro Fukutoshin Line inaugurated in June 2008. This new system operates a train according to a running plan calculated to adjust its run time to the timetable and to save energy. It also controls braking based on prediction, to stop the train comfortably and accurately at the target positions even with braking in small steps.

一般論文

### 1 まえがき

近年、都市圏では、朝晩のラッシュ緩和のため列車の運行間隔が短くなってきた。また、乗降客の安全のため、ホームドアの導入も徐々に進んでいる。これに伴い、より“均一で正確な運転”が求められるようになってきており、運転士の負荷低減や均一な運転を実現するため、自動列車運転 (ATO : Automatic Train Operation) システムや定位置停止 (TASC : Train Automatic Stop Control) システムの導入が、多くの鉄道会社で進められている。

東芝はこれまで、東武鉄道 (株) 東上線の東京地下鉄 (株) 副都心線への乗入れの決定に伴い、ATO装置の開発を行ってきた<sup>(1)-(3)</sup>。この装置は、ブレーキ力の強さを7段階で指令する既存車に適用することを前提に、高精度な列車動特性モデルを組み込み、走行時間精度や省エネルギーのために、惰力での走行 (惰行) を多用する駅間走行計画を算出し、予測制御<sup>(4)</sup>を用いた定位置停止制御により、乗りごちと停止位置精度を両立させる。

ここでは、今回開発したATO装置の概要、制御アルゴリズム、及び性能確認試験について述べる。

### 2 ATOシステム搭載車両の概要

今回開発したATO装置を搭載する車両は、東武鉄道 (株) 9000系9000型、同9050型、及び50000系50070型の3車種である。各車種の主な仕様を表1に示す。

9000型車両の速度制御方式は自動界磁式主回路チョッパ

表1. ATOシステム搭載車両の主な仕様

Specifications of rolling stock equipped with ATO

項目	仕様		
	9000型	9050型	50070型
製造初年	1981年11月	1994年9月	2007年2月
編成	6M4T*	6M4T	5M5T
質量 (空車) (t)	351	334	290
編成長 (m)	200	200	200.26
主制御装置	自動界磁式主回路 チョッパ制御装置	VVVFインバータ制御装置	
ブレーキ装置	回生ブレーキ併用 全電気指令式空気ブレーキ		
性能	最高速度 (km/h)	110	120
	加速度 (km/h/s)	3.3	
	減速度 (常用) (km/h/s)	3.7	3.5
	減速度 (非常) (km/h/s)	4.5	

\* 6M4T : モーター車6両、付随車4両の編成を示す。

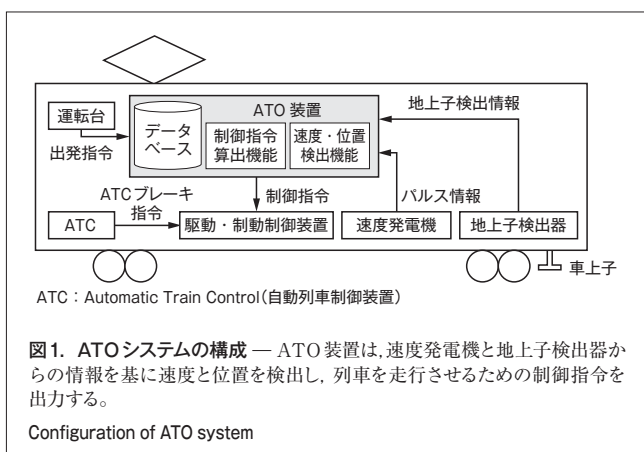
制御, 9050型と50070型の車両はVVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ制御で違いはあるが, いずれも7段のブレーキ段数が設定されている。50070型車両は停止まで電気ブレーキが有効であるが, 9000型と9050型の車両は, 15 km/h程度まで減速すると電気ブレーキの効きが低下するため, 電気ブレーキから空気ブレーキに切り替えている。この切替え後の空気ブレーキの立ち上がり速度に起因して, 停止間際の減速度が電気ブレーキに比べて小さくなる傾向が見られる, といった点をATO制御アルゴリズムで考慮する必要がある。

### 3 ATOシステムの概要

ATOシステムの構成を図1に示す。ATOシステムは, 速度と位置を検出するための速度発電機, 認識位置を補正するための地上子検出器, 及び制御指令を算出するATO装置で構成されている。

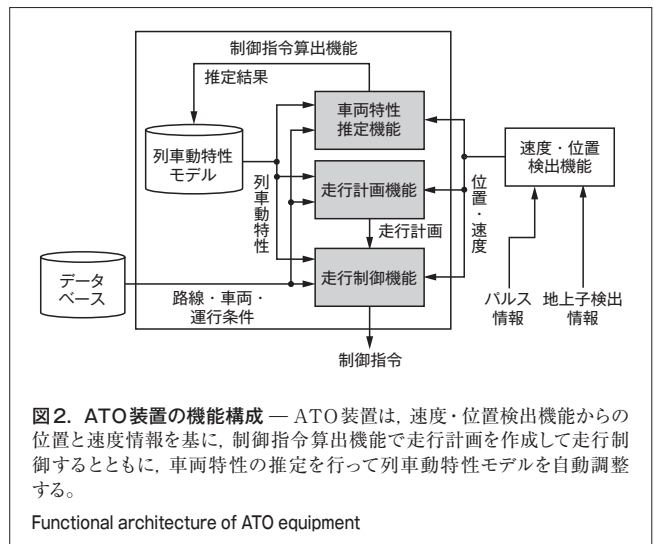
ATO装置は, 走行制御に関して次の二つの機能から構成されている。

- (1) 速度・位置検出機能 速度発電機のパルス情報から自列車の速度と位置を算出する。また, 地上子検出器から地上子検出情報が入力されると, データベースの地上子位置情報や地上子からの地点情報に基づき, 自列車位置の補正を行う。
- (2) 制御指令算出機能 自列車の位置, 速度, 制御指令, こう配や曲線などの路線条件, 列車長や列車質量などの車両条件, 及び駅間所定走行時間などの運行条件に基づいて制御指令を算出し, 駆動・制動制御装置に出力する。



### 4 ATO制御アルゴリズム

ATOシステムに対して, 制限速度を守ること, 停止位置を守ること, 及び所定の走行時間を守ることの三つの制約条件に



加え, できるだけ乗りごち良く, できるだけ省エネルギーで走行させたいという要求もある。

これらの要求を満足するため, ATO装置の制御指令算出機能は, 図2に示すように, 走行計画機能, 走行制御機能及び, これらのベースとなる列車動特性モデルを自動調整するための車両特性推定機能の三つの機能で構成している。

#### 4.1 走行計画機能

走行計画機能は, 現在位置から停止目標位置までの走行計画, すなわち加速(力行), 定速走行, 惰行, 及びブレーキをどこでどのくらい行うかを, あらかじめ算出しておく機能である。

列車動特性モデルを利用することにより, 実際の車両性能に応じた走行計画を求めることができ, 高い精度で走行時間を合わせることができる。

また, 所定の走行時間を超えない範囲で, なるべく惰行を多用する走行計画を作成する。力行又はブレーキの強さは段階的な指令であるノッチとして設定していく。このノッチ切替を減らして乗りごちを向上させ, 同時に, 無駄な力行やブレーキを行わないことで, 消費エネルギーの低減を図る。

#### 4.2 走行制御機能

走行制御機能は, 走行計画や列車の動きの予測結果に基づいて, 制御指令を決定する機能である。

基本的に, 走行計画に従ってノッチを選択する。ただし, 制限速度近傍の速度で走行している場合は, 列車速度の予測を行い, その結果に基づいて制限速度を超えないようにノッチを選択する。

駅停止の際は, 停止位置を予測し, 停止目標位置に停止できるノッチを選択する。列車動特性モデルを利用することでブレーキ力などの反応遅れを考慮できるため, 少ないノッチ切替で精度良く停止することができる。

#### 4.3 車両特性推定機能

制御指令と列車速度の推移から車両特性を推定し, 列車動

特性モデルを調整する。

列車動特性モデルは、制御指令に対応する加減速度や応答の遅れ、走行抵抗などを表し、走行計画を作成したり、列車の動きを予測したりするのに利用する。

車両の特性変化に応じて列車動特性モデルを自動的に調整することで、精度の高い走行計画が算出できるため、走行時間精度の向上が図れる。また、精度の高い予測に基づく制御を行うことができるため、停止位置精度や乗りごちの向上が図れる。

列車動特性モデルの調整には、油による車輪の滑りなど短期的な変動に対応するため走行中に行うオンライン調整と、車両の経年変化など長期的な変化に対応したり、駅間ごとの特徴を抽出するため駅停止ごとに行う学習による調整がある。

## 5 性能確認試験

今回開発したATO装置を、東武鉄道(株)9000型車両に搭載し、副都心線で、停止位置と走行時間の精度に関する性能確認試験を行った。以下に、試験方法及び結果を示す。

### 5.1 試験方法

- (1) 路線条件 副都心線は、和光市駅～渋谷駅まで16駅、駅間走行距離は900～2,200m、最大こう配は下り40%<sup>(注1)</sup>、上り35%である。地上子は、各駅に3か所、原則として、停止目標位置から手前側410m、20m、2mの位置に設置する。有楽町線と駅を共有していない小竹向原駅～渋谷駅間では、更に、停止目標位置に地上子が設置されており、地上子検出器による地上子の認識状況に応じて、ショート(停止目標位置手前)、ジャスト(停止目標位置の範囲内)、及びオーバ(停止目標位置超過)の判定結果が得られる。
- (2) 試験方法 各駅停車と急行を走行させて、空気ブレーキだけを使用して電気ブレーキを使用しない回生なしの条件と、空気ブレーキと電気ブレーキを併用した回生ありの条件での走行状況を確認した。また、走行計画の再計画機能の確認のため、運転士の手動介入によりいったん停止させた後、再出発させるという外乱試験、更に、オーバランを防ぐための距離と速度の関係を示した過走防護パターンが設置された駅での停止試験を行った。最後に、各駅停車と急行での通常走行による停止位置精度と走行時間精度の確認を行った。

### 5.2 試験結果

**5.2.1 回生なしの走行** 各駅停車と急行での走行結果例を図3に示す。各駅停車では、ノッチを頻繁に切り替える

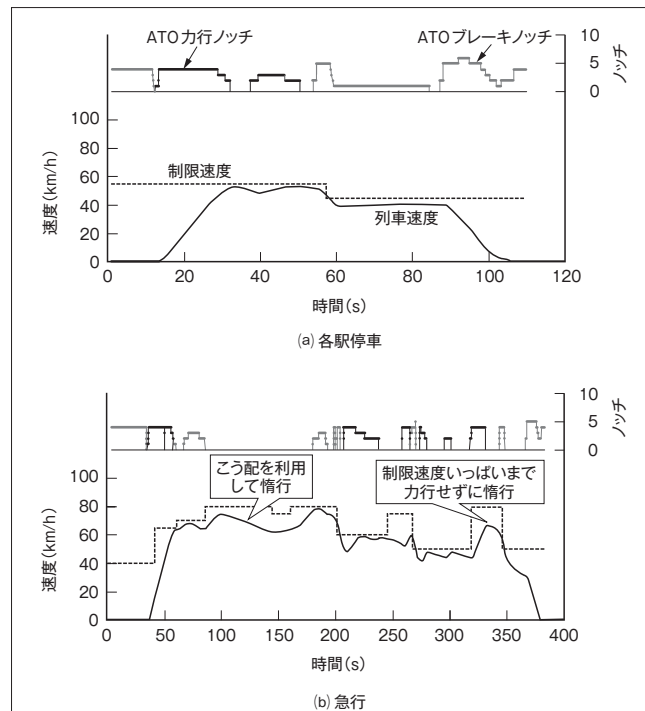


図3. 回生なしの走行結果例 — 各駅停車はノッチ切替が少なく、最後は弱めのブレーキで停止している。急行は、惰行することにより、自動で走行時間を調整し、5分45秒の所定走行時間に対して3秒早着と、高い走行時間精度を実現している。

Results of tests with local train and express train (without regeneration)

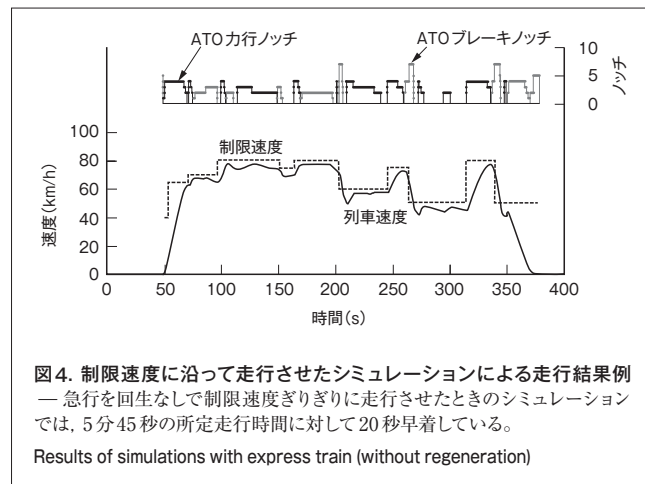


図4. 制限速度に沿って走行させたシミュレーションによる走行結果例 — 急行を回生なしで制限速度ぎりぎりに走行させたときのシミュレーションでは、5分45秒の所定走行時間に対して20秒早着している。

Results of simulations with express train (without regeneration)

ことなく走行できていることがわかる。また停止時も、ノッチを頻繁に切り替えることなく減速し、最後は弱めのブレーキで乗りごち良く停止したことがわかる。駅間の所定走行時間に比較的余裕のある急行では、必ずしも制限速度ぎりぎりで走行する必要がなく、こう配を利用して惰行すること、及び制限速度いっぱいまで力行せずに途中で惰行に切り替えることにより、自動で走行時間を調整することが確認できた。

同区間を制限速度ぎりぎりで走行させたときのシミュレーション結果を図4に示す。

(注1) 鉄道分野でのこう配の表し方で、縦断こう配は水平距離1,000m当たりで何m上下するかを示す‰(パーミル)を使う。

このシミュレーションでは、駅間の所定走行時間5分45秒に対し20秒早く到着（早着）しているが、ATOシステムでの結果（図3(b)）は3秒早着であり、高い走行時間精度が得られることが確認できた。また、図3(b)の結果の消費エネルギーはシミュレーション結果の69%であり、惰行を用いた時間合わせも行われていることが確認された。

**5.2.2 回生ありの走行** 走行結果例を図5に示す。制御に用いる列車動特性モデルのブレーキ特性は、電気ブレーキに合わせてあるため、回生なしの場合より少ないノッチ切替えて停止できていることがわかる。

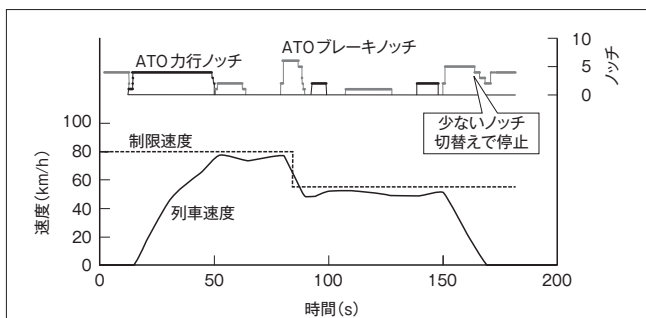
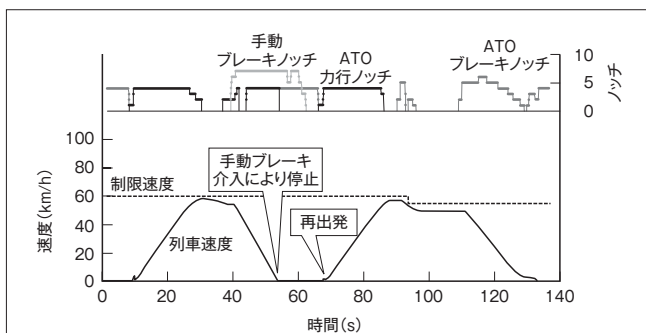
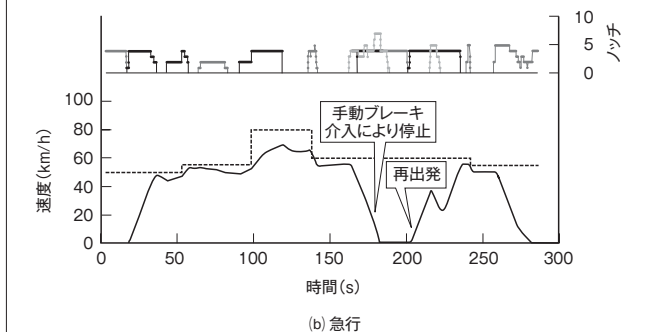


図5. 回生ありの走行結果例 — 回生ありの場合のブレーキ特性に基づいて制御を行うので、回生なしの場合より少ないノッチ切替えて停止できている。  
Results of tests with local train (with regeneration)



(a) 各駅停車



(b) 急行

図6. 手動介入時の走行結果例 — 各駅停車及び急行とも回生なしの走行で、手動ブレーキで停止した後、ATOシステムにより制限速度に沿って走行できている。

Results of tests with local train interrupted by manual braking (without regeneration)

**5.2.3 手動介入を行った場合の走行** 走行結果例を図6に示す。状況の変化に応じて走行計画を立て直し、できるだけ遅れを低減するよう制限速度に沿って走行していることが確認できた。

**5.2.4 過走防護パターン設置駅での停止** 図7に示すように、パターンに抵触することなく定位置停止制御を行えることが確認できた。

**5.2.5 停止位置精度と走行時間精度** 各駅停車と急

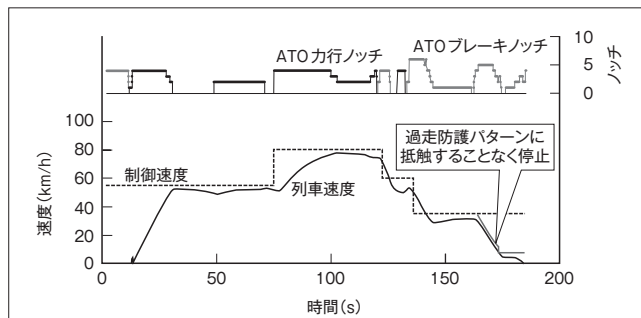
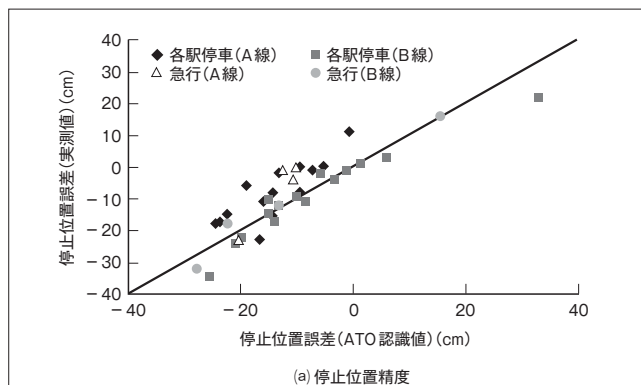
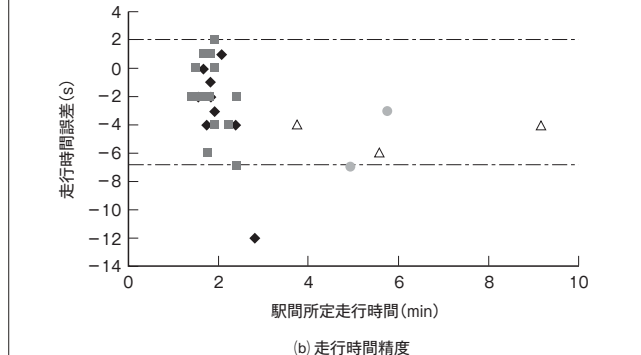


図7. 過走防護パターンの設定された駅間での走行結果例 — 駅に設定された過走防護パターンに抵触せずに定位置停止できている。

Results of tests between stations with overrun protection profile (without regeneration)



(a) 停止位置精度



(b) 走行時間精度

図8. 走行試験での停止位置と走行時間の精度 — 停止位置及び走行時間も満足いく精度が得られている。また、停止位置誤差は、ATOシステムの認識値と実測値に大きなずれはない。

Results of stopping accuracy tests with actual train

行で通常走行を行ったときの、停止位置精度と走行時間精度を図8に示す。停止位置精度は仕様値の±45 cmを十分満足していること、ATOシステムの認識値と各駅で測定した実測値に大きなずれはないことがわかる。走行時間精度は、所定走行時間に対しておおむね-7～+2秒の範囲であることがわかる。

## 6 あとがき

高精度な列車動特性モデルによる走行計画と予測制御を行うATO装置を開発し、走行試験を実施した。その結果、次の3点が確認できた。

- (1) 列車動特性モデルで停止位置誤差を予測してノッチを選択する方式により、ブレーキ段数が少ない車両でも、少ないノッチ切替えて乗りごち良く停止することができる。
- (2) 走行計画に従って走行する方式により、惰行を利用して乗りごちと省エネルギーを考慮しながら所定の走行時間で走行することができる。
- (3) 途中で手動介入による外乱が入っても、問題なく走行を継続することができる。

現在、副都心線に乗り入れる東武鉄道(株)車両3車種にATOシステムが搭載され、営業運転が行われている。停止位置精度や走行時間精度について、また、列車動特性モデルの調整の効果について、営業運転で得られるデータを基に更に確認していく。

## 謝辞

ATOシステムに関する走行試験を実施するにあたり、ご指導、ご協力をいただいた東武鉄道(株)及び東京地下鉄(株)の関係各位に感謝の意を表します。

## 文献

- (1) 大矢純子, ほか. 予測制御を用いた駅定位置停止制御装置の開発. 第42回鉄道サイバネ・シンポジウム, 論文番号509. 東京, 日本鉄道サイバネティクス協議会, 2005-12.
- (2) 大矢純子, ほか. 省エネルギーと定刻運転を目指す自動列車運転システム. 東芝レビュー. 61, 9, 2006, p.33-36.
- (3) 根岸 徹, ほか. 停止位置精度向上と省エネを目指したATOシステムの開発. 第44回鉄道サイバネ・シンポジウム, 論文番号513. 東京, 日本鉄道サイバネティクス協議会, 2007-11.
- (4) 大矢純子, ほか. 自動列車運転システムのためのモデル予測型パターン追従制御アルゴリズム. 電気学会論文誌D. 115, 1, 1995, p.53-62.
- (5) 鎌田恵一, ほか. 学習機能を備えた自動列車運転アルゴリズムの開発. 第39回鉄道サイバネ・シンポジウム, 論文番号516. 東京, 日本鉄道サイバネティクス協議会, 2002-11.



大矢 純子 OHYA Junko

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 産業・自動車技術開発部主務。鉄道車両システムの開発に従事。電気学会, 計測自動制御学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



射場 智 IBA Satoshi

電力流通・産業システム社 府中事業所 交通車両情報システム部主務。鉄道車両システムの設計・開発に従事。

Fuchu Complex



中澤 弘二 NAKAZAWA Hiroji

電力流通・産業システム社 交通システム事業部 交通制御システム技術部参事。車両システムのエンジニアリング業務に従事。

Transportation Systems Div.