

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

Automatic Train Operation System with Adjustment of Run Times to Train Schedule and Energy Saving

大矢 純子 鎌田 恵一 中澤 弘二

■ OHYA Junko ■ KAMATA Keiichi ■ NAKAZAWA Hiroji

自動列車運転 (ATO : Automatic Train Operation) システムは、運転士に代わり、列車の運転を自動で行うものである。近年、運行ダイヤの高密度化やホームドアの導入に伴い、正確な駅停止や走行時間の安定を目的に、多くの鉄道会社で導入が進められている。

東芝の開発した ATO システムは、走行時間を守り省エネルギーを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って、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。

現車走行試験及びシミュレーション試験により、精度よく停止目標位置に停車できることと、走行途中で手動介入があっても、再計画を行って所定のダイヤに対し遅れずに走行できることを確認した。

Automatic train operation (ATO) systems to operate trains automatically in place of drivers are being introduced into many railway companies as train service schedules become heavier and the use of platform door systems increases. An ATO system should ensure accurate stopping at stations and stable run times between stations.

Toshiba has developed a new ATO system that operates a train according to a running plan calculated to adjust its run time to the train schedule and to save energy. This system also controls braking based on prediction, to stop the train comfortably and accurately at the target positions.

We have confirmed accurate station stopping and run time recovery by recalculating a running plan through tests with an actual train and computer simulations.

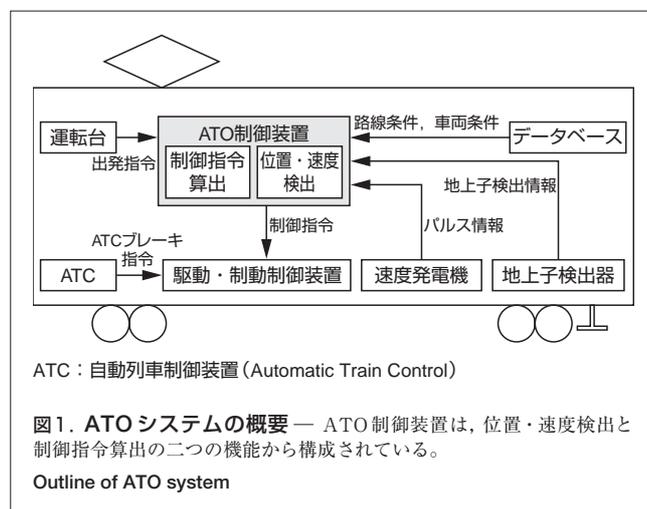
1 まえがき

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は短くなってきた。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、運転士の負担を軽減するため、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。

ATO システムには、駅の所定位置に列車を精度よく停車させることと、駅間の走行時間が安定していることが要求される。東芝は、更に、良好な乗りごちと省エネルギーを目指した ATO システムの開発を行っている。乗りごちと停止精度の両立のために、駅停止制御に予測制御を応用し、消費エネルギー低減のために、惰行 (惰性での走行) を多用する駅間走行計画を算出する。

2 ATO システムの概要

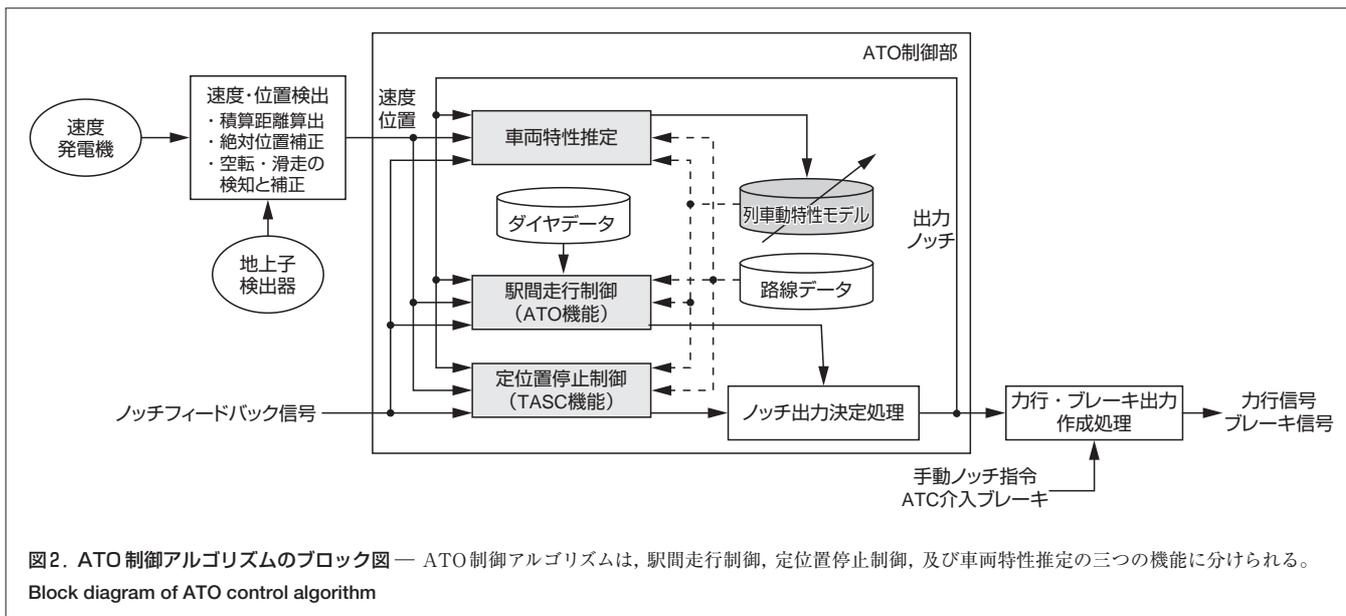
ATO システムの概要を図1に示す。ATO 制御装置は、大



きく次の二つの機能から構成されている。

- (1) 位置・速度検出 列車の位置と速度を検出する機能である。車軸に取り付けられた速度発電機で、車輪の回転に応じたパルスが発生するので、これをカウントして列車の位置と速度を検出する。

また、路線上に設置された地上子を、地上子検出器 (車上子) が検出すると、地上子からの情報、あるいは



データベースの地上子設置位置情報に基づいて、車上認識位置情報を修正する。

- (2) 制御指令算出 列車の走行状態（速度、位置、出力ノッチ^(注1)、など）、路線条件（こう配、曲線、制限速度、など）、車両条件（列車重量、列車長、力行（加速）・ブレーキ力、ノッチ段数、など）、及び走行ダイヤなどに基づいて、制御指令を算出し、列車の駆動・制動制御装置に出力する。

3 ATO 制御アルゴリズム

制御指令は、ATO 制御アルゴリズムを用いて算出する。ATO 制御アルゴリズムは、大きく次の三つの機能に分けられる(図2)。

- (1) 駅間走行制御
- (2) 定位置停止制御
- (3) 車両特性推定

これらの働きについて、以下に述べる。

3.1 駅間走行制御

駅出発から、次の駅への停止制御を開始するまでの走行を制御する機能である。

まず、駅発車時に、次駅までの走行計画を算出する。走行計画は、力行、定速走行あるいは惰行、ブレーキを組み合わせ、制限速度を守るように作成する。所定の走行時間に対し、計画走行時間に余裕があるときは、走行計画の定速走行部分を惰行に置き換えて、走行時間を合わせる。

(注1) 力行（加速）又はブレーキの強さは、段階的に指令するように設定されている。これをノッチと言う。

定速走行では、空気抵抗やこう配による抵抗を打ち消して速度をなるべく一定に保つため、速度や路線情報に基づいて、ノッチを切り替えながら走行する。惰行では、力行もブレーキも行わないので、定速走行を惰行に置き換えれば、モータやインバータへの熱的負荷の低減、乗りごちの向上、消費エネルギーの低減を図ることができる。

走行中は、走行計画のノッチ情報を制御指令として出力する。

ATO システムで想定している列車動特性モデルと、実際の列車の動特性とのずれや、車輪の滑りなどが原因で、走行計画どおりのノッチ指令を出力しても、走行計画の速度と実際の速度は必ずしも一致しない。実際の速度を走行計画の速度に無理に追従させようとすると、ノッチ指令を頻繁に補正することになり、ノッチ切替え回数が増えて乗りごちが悪化してしまう。しかし、制限速度オーバや大きな時間誤差が発生しなければ、走行計画の速度に列車速度を厳密に一致させる必要はないので、ノッチ指令の補正は速度オーバ回避など最小限にとどめる。走行計画とのずれが設定値を超えた場合は、走行計画の再計画を行う。これにより、ノッチ切替えによる乗りごちの悪化を最小限にした走行が可能となる。

3.2 定位置停止制御

停止目標位置に、列車を正確に停止させる機能である。

まず、停止目標位置に近づいたら、現在位置からブレーキを開始したときの停止位置を繰り返し予測し、停止目標位置近辺に停止すると予測されるようになったら、減速を開始する。ノッチ切替えの効果が列車速度に現れるまでのむだ時間を考慮することにより、適切なタイミングで減速を開始できる。

減速中は、現在出力中のノッチを基準に、列車が停止する

までの予測を行い、停止位置の予測値が停止目標位置にもっとも近いブレーキノッチを選択する。むだ時間を考慮した正確な予測を行うことで、停止位置誤差を抑え、むだなノッチ切替を予防して、乗りごちをなるべく損なわずに減速する。

停止間際には停止位置予測の精度を上げ、高い停止位置精度を確保する。

なお、駅間走行制御においても、制限速度が下がる部分での減速は定位置停止制御機能を流用し、確実に制限速度まで減速させる。

3.3 車両特性推定

列車の速度の推移から車両特性を推定し、列車動特性モデルを補正する機能である。

定位置停止制御での停止位置の予測では、列車の動特性モデルを利用する。動特性モデルが実際の列車の動特性とずれていると正確な予測ができず、停止位置精度が悪化したり、むだなノッチ切替が発生して乗りごちが悪化したりする。

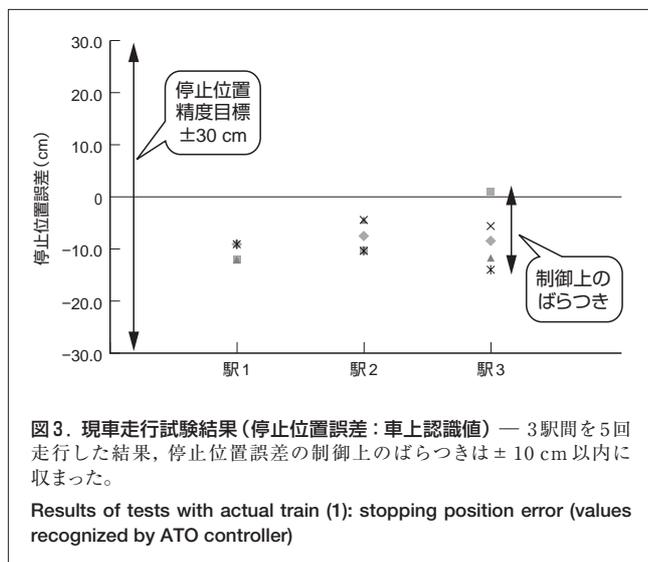
常に車両特性を推定し、列車動特性モデルをオンラインで修正することにより、正確な予測ができる。これにより停止位置精度の向上を図り、乗りごちの悪化を防ぐ。

4 性能評価試験

実際の列車を用いた現車走行試験を行い、停止位置精度と乗りごちについて評価を行った。また、シミュレーション試験により、駅間走行時間について評価を行った。

4.1 現車走行試験

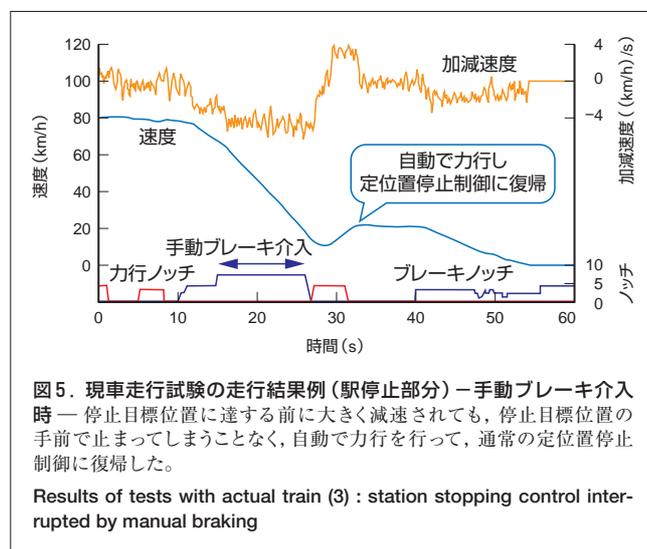
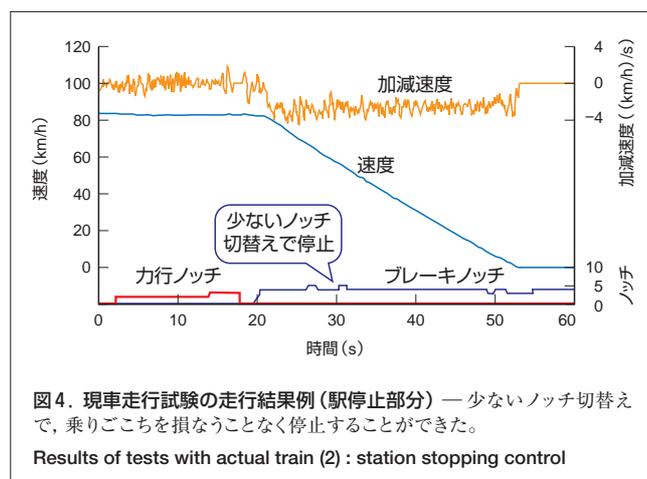
東武鉄道(株)の車両にATO装置を搭載し、東武鉄道路線で現車走行試験を行った。3駅間を5回走行した結果に



ついて、停止位置誤差(車上認識値)を図3に示す。データ数が少ないこともあり、駅ごとにばらつきが異なっているが、制御上のばらつきは±10 cm以内であった。

走行結果の一例を図4に示す(駅停止部分)。少ないノッチ切替で、乗りごちを損なうことなく停止できている。

また、定位置停止制御中に手動ブレーキ介入を行ったときの走行結果の一例を図5に示す。停止目標位置に達する前に大きく減速されても、停止目標位置の手前で止まってしまうことなく、自動で力行を行って、通常の定位置停止制御に復帰した。



4.2 シミュレーション試験

東武鉄道路線3駅間のデータを用いて、計算機シミュレーション試験を行った。

目標走行時間を変えながらシミュレーションを行い、走行時間を確認したところ、目標走行時間に対する走行時間誤差は-2.5~+5.7 sで、目標走行時間の-1.6~+2.8%であった(表1)。

表1. シミュレーション試験結果(走行時間誤差)

Results of simulations (1) : run time error

No.	シミュレーション条件 目標走行時間	走行時間誤差 (s)		
		駅間1	駅間2	駅間3
1	所定走行時間	-0.5	-2.5	-2.1
2	所定走行時間より5s長く	5.7	-1.5	-1.7
3	所定走行時間より5s短く	1.0	0.9	-0.6

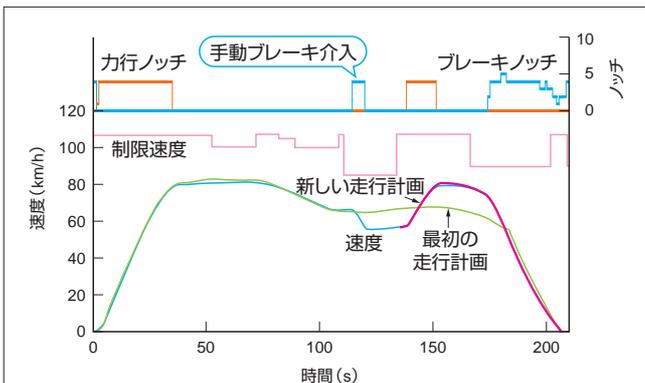


図6. シミュレーション試験結果(走行時間の回復) — 手動ブレーキ介入を行って列車速度を強制的に落としたところ、再計画を行って元の走行計画より高い速度で走行することにより、走行時間を回復した。

Results of simulations (2) : recovery of run time

また、手動ブレーキ介入を行って列車速度を強制的に低下させたところ、再計画を行って元の走行計画より高い速度で走行することにより、走行時間を回復することが確認できた(図6)。

5 あとがき

ATOシステムの概要と試験結果について述べた。

今後、更に走行試験を行い、環境や乗車率などの外乱に対する停止位置精度のロバスト性、乗りごこち、及び定時性などの向上を図る。

謝辞

ここで述べた現車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)の関係各位に感謝の意を表します。

文献

- (1) 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.
- (2) 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. 2002.



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 社会システム開発部. 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



鎌田 恵一 KAMATA Keiichi

産業システム社 府中事業所 交通車両情報システム部主査. 鉄道車両システムの設計・開発に従事。電気学会会員。

Fuchu Complex



中澤 弘二 NAKAZAWA Hiroji

産業システム社 交通システム事業部 交通車両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.