

定時性、快適性、及び省エネを実現する ATOとEE列車運行制御システム

ATO System for Improvement of Riding Comfort and Stopping Position Accuracy
and EE Train Operation Control System for Highly Efficient Train Operations

服部 陽平 関口 孝公 田嶋 真大

■ HATTORI Yohei ■ SEKIGUCHI Takahiro ■ TAJIMA Masahiro

自動列車運転システム (ATO: Automatic Train Operation) は、省エネ性に優れ快適な鉄道システムを支える技術の一つである。

東芝は、車両のブレーキ特性を学習し駅間走行計画を状況に応じて自動作成することで、駅間走行時間を守りながら省エネ性に優れて乗り心地が良く、停止位置精度の高い走行を実現するATOを開発した。ATO送受信部もソフトウェア無線技術を活用して開発することで、様々な構成に対応できるようにした。更に、中央制御装置で走行列車全体の運行を把握し、先行列車が遅延している場合でも信号制御による後続列車の減速や停止を可能な範囲で抑制するよう各列車に運行調整情報を送信することで、運行の安定性と省エネを両立させた省エネ列車運行制御システム (以下、EE列車運行制御システムと呼ぶ。(EE: Energy Efficient)) を開発した。

An automatic train operation (ATO) system is a technology aimed at realizing both energy saving and riding comfort in railway systems.

Toshiba has now developed an ATO system that offers improvements in energy saving, riding comfort, and stopping position accuracy while maintaining the correct running time between stations by automatically generating a running plan between stations according to the operating circumstances, taking into consideration the learned braking characteristics of each vehicle. We have also developed a transmitter and receiver for the ATO system, which allow communication between ground devices and on-vehicle devices in order to exchange stopping position information, using a software radio technology to flexibly respond to various configurations. To expand the range of applicability of this ATO system, we are engaged in the development of an energy-efficient (EE) train operation control system in which the central control unit can transmit an adjusted operation plan to each train based on the entire train information collected by the ATO systems in order to control the following train so as to minimize braking and stopping even in the event of a delay of the preceding train, thereby achieving a balance between stable train operation and energy saving.

1 まえがき

ATOは、省エネ性に優れて快適な鉄道システムを支える技術の一つである。東芝は、運転曲線どおりに走って止まる従来の自動運転だけではなく、列車の走行状況を常時監視及び学習して、乗り心地良く省エネ性に優れた走行を実現するATO装置を実用化してきた。

このたび、学習機能の強化により、新車だけでなく、既存車についても乗り心地と停止位置精度の向上を両立するATOを開発した。また、新たにATO送受信部を開発し、送受信部と制御部一体型のATO/TASC (Train Automatic Stop Control) 装置など、様々な構成に対応できるようにした。開発したATO送受信部は、ソフトウェア無線技術を活用した、内部二重化したFPGA (Field Programmable Gate Array) による効率的なハードウェア構成を実現している。

当社は更に、新しい試みとして、列車の早着や遅着を防ぐとともに、エネルギー消費量の管理を可能にするEE列車運行制御システムも開発した。中央制御装置で走行列車全体の動きを把握し、一部の列車が遅延している場合には各列車にどのように運転すべきかを指示して、信号制御による後続列車

の減速や停止を回避し、減速と再加速による後続列車遅延と消費エネルギー増加とを抑制する。このシステムの車上装置は、ATO運転でない列車では、運転士に対する運転支援装置として機能する。自列車の駆動特性データを用いて、中央制御装置の指示に従った運転を行うための制御指令を算出することで、車両性能に応じた効率の良い運転を実現する。

2 乗り心地と停止位置精度の向上を目指したATO

ATOは、運転士に代わって列車の運転を自動で行い、制限速度、停車位置、及び走行時間を守るように列車を走行させる。更に、できるだけ乗り心地良く省エネ性に優れた走行を行うことも望まれる。

2.1 走行計画と予測制御

当社のATOは、運転曲線に走行パターンを合わせ込む従来の制御だけではなく、走行計画を立てて、列車の走行状況を常時監視及び学習して走行計画を修正することで、乗り心地の良さと高い停止位置精度を両立させてきた⁽¹⁾。走行計画の概念を図1に示す。走行計画に従って走行することで、定時運転、ノッチ切替えが少なく乗り心地の良い走行、及び惰行

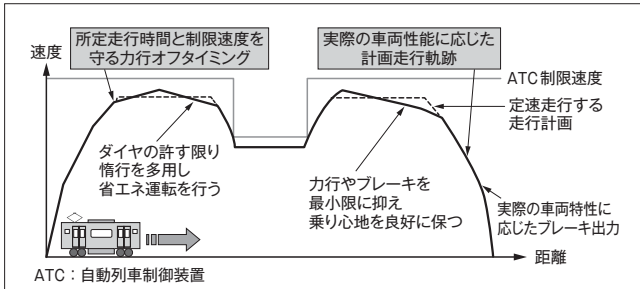


図1. 惰行を多用する走行計画の概念 — 走行計画に従って走行することで、定時運転、ノッチ切替えが少なく乗り心地の良い走行、及び惰行を多用する省エネ運転を実現している。

Concept of running plan with frequent use of coasting

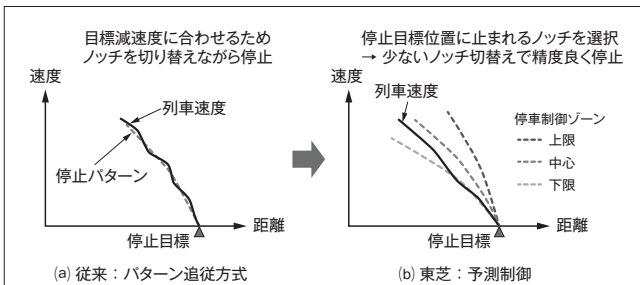


図2. 予測制御に基づく停車制御 — 予測制御に基づく停車制御により、少ないノッチ切替えて乗り心地良く精度良く列車を停止させる。

Stopping control based on predictive control

を多用する省エネ運転を実現している。

駅停車時は、ブレーキ力の反応遅れまで考慮した列車モデルに基づく予測制御により、少ないノッチ切替えて乗り心地良く精度良く列車を停止させる。予測制御に基づく停車制御の概念を図2に示す。更に、学習によって列車モデルを自動調整して、現地調整期間の短縮、及び車両特性の編成間個体差や経年変化への対応を実現している。

2.2 既存車に対する高度な学習及び走行計画補正機能

車歴の長い既存車は、ブレーキ力が安定しないものもあり、ATO化を行う際は、停止位置精度と乗り心地の両立が難しい。そこで、駅停車制御ゾーン(図2)の中を細かく領域分けし、ブレーキ力のずれを即時に学習してブレーキノッチ指令を補正する処理を追加した。その概要を図3に示す。ゾーンの外側に近づくほど、即時に学習してブレーキ力を変える度合いを大きくすることで、ブレーキ力が安定しない既存車でも、高い停止位置精度と乗り心地の良さを両立させた。

3 ソフトウェア無線応用ATO送受信部の開発

当社はまた、ATO地上子との送受信制御を行う、ATO送受信部の開発を行った⁽²⁾。ATO地上子から駅コードや次駅までの残距離情報を受信し、駅停車時には停止検知情報を

ATO地上子に送信する、停止位置精度の確保や安全なホームドア開閉に必要な不可欠な装置である。

3.1 ATO送受信部の構成

ATO送受信部の外観を図4に、ブロック構成を図5に示す。ATO送受信部は、①情報波送受信部、②電力波送受信部、③制御部、④入出力部、⑤電源部、⑥記録部、⑦FSK(Frequency Shift Keying)伝送部、及び⑧リレー部から構成される。

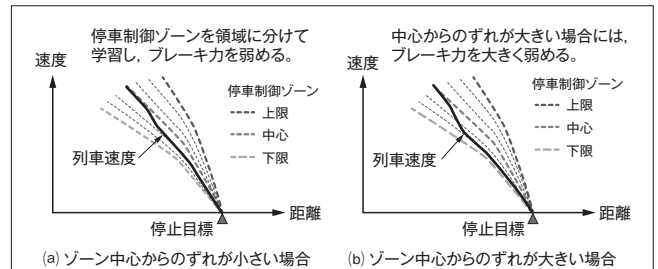


図3. 応変な即時ブレーキ力学習 — 駅停車制御ゾーンの中を細かく領域分けし、ブレーキ力のずれを即時学習してブレーキノッチ指令を補正する処理を追加した。

Learning of adaptable immediate braking force

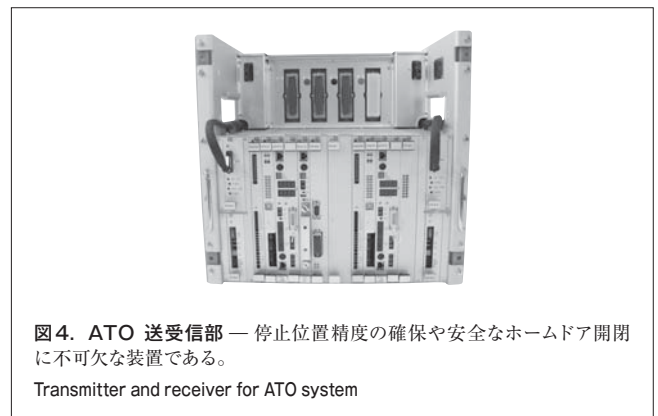


図4. ATO送受信部 — 停止位置精度の確保や安全なホームドア開閉に必要な不可欠な装置である。

Transmitter and receiver for ATO system

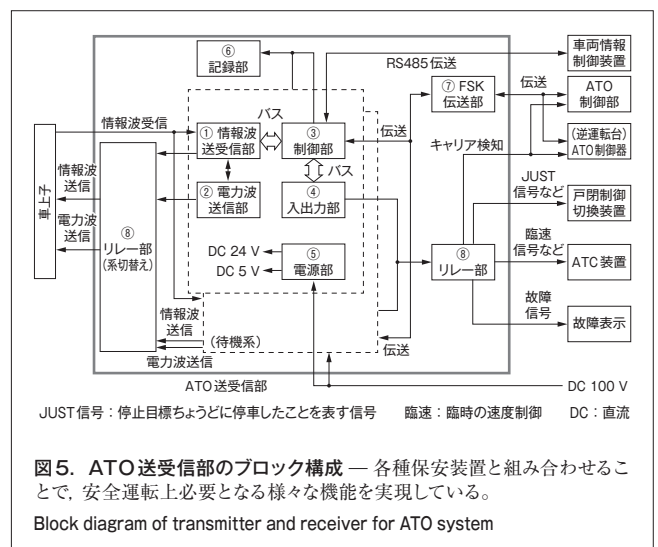


図5. ATO送受信部のブロック構成 — 各種保安装置と組み合わせることで、安全運転上必要となる様々な機能を実現している。

Block diagram of transmitter and receiver for ATO system

3.2 ソフトウェア無線によるトランスポンダ送受信処理

ATO送受信部を構成するブロックのうち、①情報波送受信部と②電力波送受信部により、ATO地上子との間でトランスポンダ送受信処理が行われる。トランスポンダ送受信処理は、③制御部から出力された情報をATO地上子へ情報波として送信する一方、ATO地上子から送信された情報波を受信し③制御部に出力する。また無電源のATO地上子を駆動する電力波を送信する。

当社は、このようなトランスポンダ送受信処理にソフトウェア無線技術を応用した。ソフトウェア無線とは、ハードウェアが記憶している、周波数や変復調方式などのパラメータを、ソフトウェアにより別パラメータに書き換えて再構成可能な無線方式である。今回開発したATO送受信部では、トランスポンダ送受信処理機能（ソフトウェア）を、FPGA（Field Programmable Gate Array）に実装することで再構成可能にした。これにより開発初期段階での基本機能に対して追加機能を入れ込むことが可能になり、迅速かつ柔軟な開発を実現するとともに、部品点数を削減して信頼性向上にも寄与した。

3.3 トランスポンダ送受信処理における健全性確保手段

トランスポンダ送受信処理は離散的に配置されたATO地上子により制御を行う点制御方式であるため、ATO地上子からの通信を読み飛ばすのを防ぐために受信系の故障検知と電力波の正常確認が必要になる。以下で述べる健全性確保手段により、これらを行う。

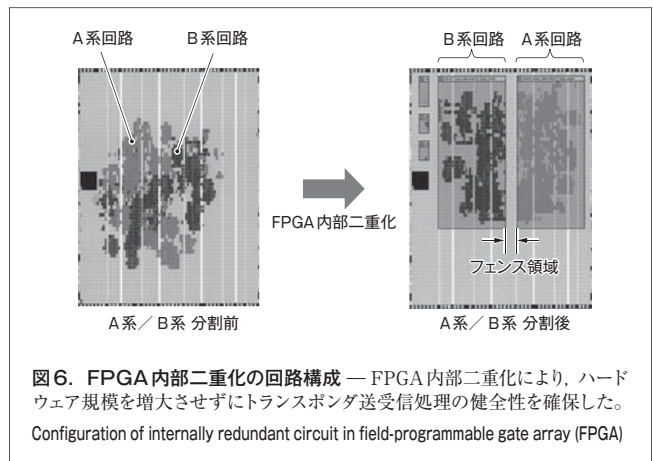
3.3.1 FPGA内部の二重化 健全性確保手段のうち、FPGAに対しては内部の二重化を採用した。

FPGAはデバイス自体が故障（ハード故障）を起こすと通常は故障を検知できない。ハード故障を検知する手段として、複数デバイスの出力結果を照合する二重化が挙げられる。しかし、デバイス数を増やすと故障率が増加して信頼性の低下につながるおそれがある。これを防ぐため、今回開発したATO送受信部では単一のFPGAデバイス内に同一のトランスポンダ送受信処理回路を2個（A系及びB系）設けてFPGA内部を二重化し、出力結果の照合を行うことで健全性を確保する。

複数デバイスを用いる二重化と同等の健全性を確保するため、FPGA内において二重化を行う箇所は物理的に距離を置いて隔離し、それぞれの回路の独立性を担保している。これにより、FPGA内部でのハード故障を検出できる。内部二重化を行ったFPGA回路の構成を図6に示す。

FPGA内部の二重化により、複数のデバイスを用いて二重系を構成する場合と同等の独立性を確保でき、ハードウェア規模を増大させずにトランスポンダ送受信処理の健全性を確保できるようになった。

3.3.2 安全性評価 このトランスポンダ送受信処理は第三者機関による安全性評価を受け、問題がないことが示されている。



3.4 開発したATO送受信部の応用

ATO送受信部開発の効果として、各種保安装置との組み合わせができるようになり、例えばATO送受信部とATO制御部とを一体化した小型のATO/TASC装置の製作が可能になった。また、ATO送受信部に大容量記録を備えることで、ATO地上子の状態を常時監視でき、予防保全への応用も可能になった。

4 EE列車運行制御システム

国内の鉄道事業者は古くから省エネを推進してきており、省エネ機器の導入が進められている。また、列車の運転操作に関する省エネも、運転士やATO装置により進められている。当社は更に、列車全体の運行制御に着目し、運行の安定性と省エネを両立させるEE列車運行制御システムを開発した。

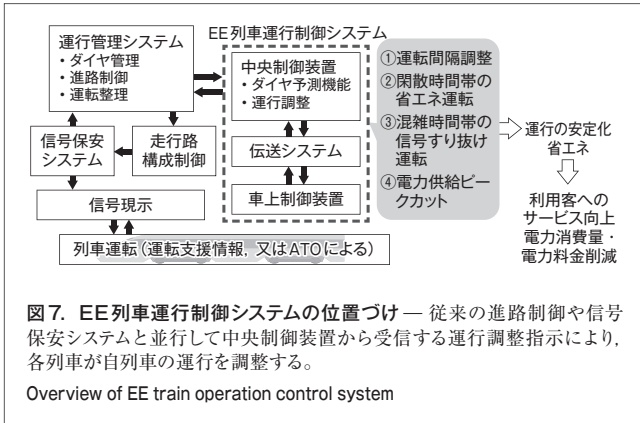
4.1 EE列車運行制御システムの機能概要

EE列車運行制御システムは、中央制御装置により走行列車全体の運行を把握し、各列車が運行ダイヤに従って、又は所定の運行間隔に従って走行できるよう、各列車に運行調整情報を与える。列車の走行に乱れがある場合には、信号制御による列車の減速や停止を回避するための制御指令を与えることで、遅延を低減し消費エネルギーの増加を抑制する。また、車両特性の違いや乗車率の違いなどを考慮して駅間走行時間に見合った確な運転速度で運転することで、エネルギー消費量の低減を目指す⁽³⁾。EE列車運行制御システムの位置づけを図7に示す。従来の進路制御や信号保安システムと並行して、中央制御装置から受信する運行調整指示により、各列車が自列車の運行を調整することが特徴である。

海外の自動運転の地下鉄では、運行間隔を運行管理装置により制御するケースが多い。今後も増加すると予想される海外の新規都市鉄道や国内の通勤路線での導入を目指している。

4.2 運行調整機能

中央制御装置には二つの機能がある。ダイヤ予測機能と運行調整機能である。



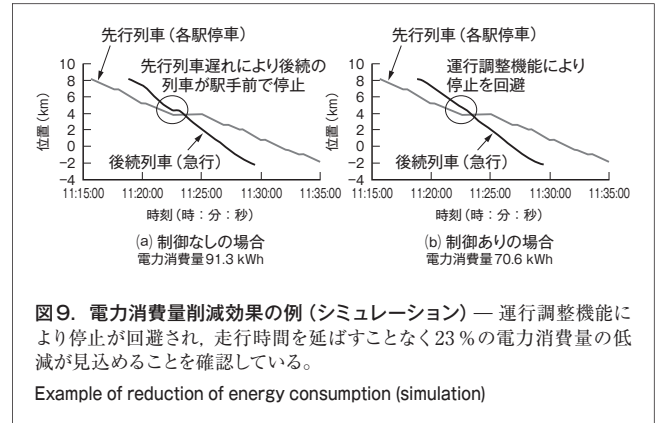
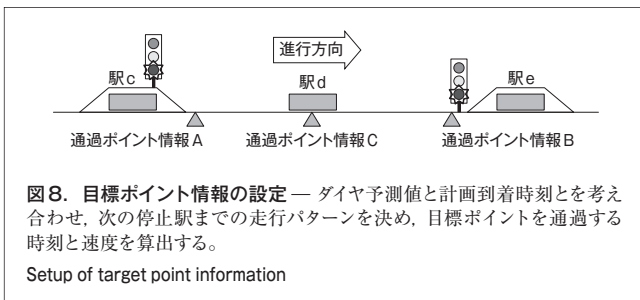
ダイヤ予測機能では、列車の駅への到着や出発のたびに、全列車の現時点以降の停車駅における着発時刻の予測値を更新する。

運行調整機能では、これらのダイヤ予測値と計画到着時刻とを考え合わせ、次の停止駅までの走行パターンを決め、目標ポイントを通る時刻と速度を算出する(図8)。通過ポイント情報Aでは、後続の列車が遅滞なく駅cに到着できるように、先行列車が駅構内を進入すべき時刻を設定する。通過ポイント情報Bでは、駅eへの進入に向けて、信号停止を回避しかつ遅延を最小に抑えるような時刻と速度を設定する。通過ポイント情報Cは、通過ポイント情報AとBとの中間にあって、運行ダイヤに沿った運転を行うために設定する。

一方、車上制御装置では、受信したこれらの情報と自列車の駆動特性などに基づき、エネルギー消費量にも配慮した運転曲線を作成し、ATOの制御に用いる。手動運転の場合には、運転士に対する運転支援情報を作成し提示する。運転士は提示された運転支援情報を参照し運転する。

4.3 シミュレーション例

通勤路線を想定して、EE列車運行制御を付加することによる電力消費量削減効果を計算機シミュレーションにより検証した。この例では、全長約10 km、10駅、途中駅で急行列車通過のために各駅停車の退避があり、退避の遅れにより急行列車が減速や停止を強いられることを想定した。結果を図9に示す。制御により停止が回避され、走行時間を延ばすことなく23%の電力消費量の低減が見込めることを確認している。



5 あとがき

世界規模で省エネ化が推進されている現在、安全かつ正確で効率の良い輸送機関として、鉄道への注目はますます高まることが期待されている。今後も更なる鉄道の高付加価値化に寄与するため、乗り心地及び停止位置精度を向上させた信頼性の高いATOと運行安全性及び省エネ特性を両立させたEE列車運行制御システムの両面で開発を継続していく。

EE列車運行制御システムの開発は、国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)の「平成25年度研究成果最適展開支援プログラム」(A-STEP)の支援を受け、上智大学の参画を得て実施した。

文献

- 大矢 純子 他. 東芝の自動列車運転システム — 走行計画により自動で駅間走行時間を守りながら省エネ走行を実現. 鉄道車両と技術. 17, 5, 2011, p.21-25.
- 関口 孝公 他. “ソフトウェア無線を応用したATO 送受信器の開発”. 第52回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集. 大阪, 2015-11, 日本鉄道サイバネティクス協議会. 2015, 論文番号527.
- 三吉 京 他. システム全体のエネルギーを効率的に管理, 制御する鉄道EMS. 東芝レビュー. 68, 4, 2013, p.7-10.



服部 陽平 HATTORI Yohei

インフラシステムソリューション社 鉄道システム事業部 車両システム技術部主務。鉄道車両システムの開発及び技術営業に従事。

Railway Systems Div.



関口 孝公 SEKIGUCHI Takahiro

インフラシステムソリューション社 府中インフラシステムソリューション工場 鉄道システム部主務。鉄道車両システムの開発・設計に従事。

Fuchu Operations - Infrastructure Systems & Solutions



田嶋 真大 TAJIMA Masahiro

インフラシステムソリューション社 鉄道システム事業部 交通ソリューション部。鉄道エネルギーソリューション及び列車運行制御システムの開発に従事。

Railway Systems Div.