

列車運転制御における省エネルギー化

吉本剛生* 田原一浩**
廣石 高** 青山武郎**
鳥居尚史**

Energy-saving Train Control System

Kouki Yoshimoto, Takashi Hiroishi, Hisashi Torii, Kazuhiro Tahara, Takeo Aoyama

要 旨

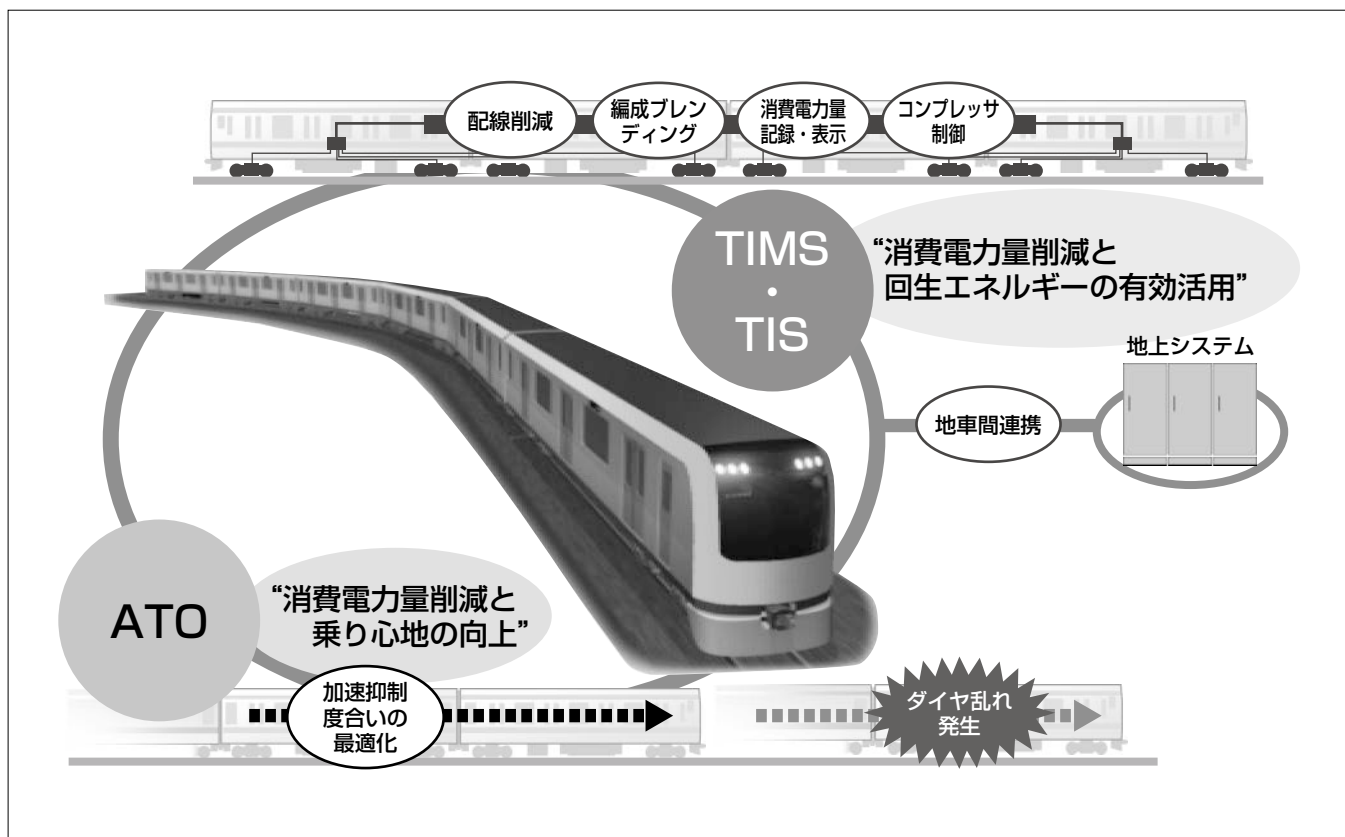
鉄道はエネルギー効率が良く、環境に優しい交通システムであり、地球温暖化防止のために大きな役割を担うものとして期待されている。そのため、安全性や定時性、利便性を維持・向上しつつ、より一層環境負荷の低い交通システムとして進化することが求められる。

環境負荷を考える上で、まず問題となるのは消費電力である。三菱電機では、これまでもインバータや主電動機、空調装置などの個々の装置で省エネルギー化に努め、高い成果を収めてきた。今後、より一層の省エネルギー化を進めるために、これらの対策と並行して列車運転制御の観点からの対策も必要不可欠である。

本稿では、列車運転制御における省エネルギー化をテーマとし、自動列車運転装置 (Automatic Train Operation :

ATO) と車両情報統合管理装置 (Train Integrated Management System : TIMS) ・車両情報制御装置 (Train control Information management System : TIS) に焦点を当てて、当社の環境問題への取り組みについて述べる。

ATO に関してはダイヤ乱れ時に着目し、信号情報を利用して無駄な加減速を抑制し、消費電力量削減と乗り心地向上を実現する制御方法について述べる。TIMS/TIS に関しては、回生エネルギーの有効活用に貢献している編成単位でのブレーキ制御技術 (編成ブレンディング) について述べる。また、現在検討を進めている、TIMS/TIS の情報管理機能を用いて消費電力量削減に貢献する取り組みについて述べる。



列車運転制御における省エネルギー化

鉄道システム全体の省エネルギー化を実現するには、個々の装置だけではなく、列車運転制御の観点からの取り組みも必要である。列車運転制御の一つとして、ATOとTIMS/TISに関して省エネルギー化への取り組みを進めている。

1. ま え が き

鉄道事業者並びに各メーカーは、鉄道システムをより安全・高速・快適にするために様々な努力を続ける一方で、ブレーキ力を電力として再利用する回生ブレーキの効率向上や車両形状の改良など、様々な面から省エネルギー化に取り組んできた。特に近年、環境に対する要求は急速に高まっており、当社でもVVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータや主電動機、空調装置などの個々の装置に対して省エネルギー化に努め、高い成果を取めている。今後、より一層の省エネルギー化を進めるためには、これら装置単位の対策と並行して列車運転制御の観点からの対策も必要不可欠である。

本稿ではこのような背景に基づき、列車運転制御における省エネルギー化をテーマとし、自動列車運転装置(ATO)と車両情報統合管理装置(TIMIS)・車両情報制御装置(TIS)に焦点を当て、当社の取り組みについて述べる。

2. ATOにおける省エネルギー化の取り組み

2.1 ATOの概要

列車運転制御システムの一つであるATOは、保安信号装置(主にATC(Automatic Train Control))によって安全が確保された下で、あらかじめ設定された走行パターンに沿って列車を自動走行させるものである。当社のATOはベテラン運転士を想定した知識ベースを用いた“エキスパートシステム”によって、安全性・定時性・乗り心地などを考慮した制御を行っている⁽¹⁾。この知識ベースは、国内トップシェアの実績を基に進化を続けており、きめ細かで精度の良い運転を実現している。

2.2 走行パターンによる消費電力量の違い

列車走行については、同一駅間を同一時分で走行しても、その走行パターン次第で消費電力量が大きく異なることが知られている。例として図 1 に、ある駅間(距離 1 km、出発駅直後が下り勾配(こうばい)、停車駅手前が上り勾配)を走行する二つの走行パターンを示す。単純走行パターンは高速域で一定速度を保って走行するのに対し、最適走行パターンでは、ある速度から惰行を行って消費電力量を削減している。惰行開始速度は、単純走行パターンと走行時分が同じになるように調整されている。この二つの走行パターンでの消費電力量の比較結果を表 1 に示す。両パターンの走行時分は同一であるが、最適走行パターンの消費電力量は単純走行パターンと比較して、1 割程度も低くなっている。一般に、駅間が短い場合には、最大加速→惰行→最大減速の走行パターンがエネルギー効率的には一番良いことが知られている⁽²⁾。

従来のATO走行パターンは、鉄道事業者が運転士向けに設計したものをそのまま使用することが多かった。その

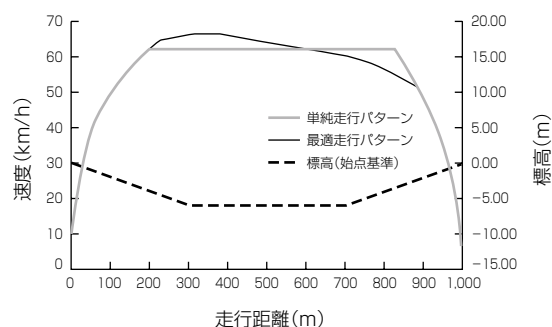


図 1. 走行パターンの比較

表 1. 走行パターンによる消費電力量比較

	走行時分	消費電力量 ^(注1)
単純走行パターン	77秒	100
最適走行パターン	77秒	89

(注1) 単純走行パターンでの値を100とした相対値

走行パターンは、省エネルギーという観点からの考慮はされているものの、必ずしも最適化されたものではなかった。したがって、ATO走行パターンを省エネルギーの観点から最適化することによって、これまでよりも数%~10%程度の消費電力量削減効果が見込まれる。また仮に駅間の走行時分を数秒程度調整可能であれば、更に大きな効果が期待できる。

2.3 ダイヤ乱れ時対応の省エネルギー運転

2.3.1 ATC動作の走行パターンへの影響

ダイヤ乱れのない“定常時”での省エネルギー化は、先に述べたような走行パターンの静的な最適化で対応可能である。しかし、列車は常に定常時の条件で走行できるわけではなく、ダイヤ乱れや臨時の速度制限などの“非定常”の条件下でも走行しなければならない。特にダイヤ乱れに関しては、高密度線区のラッシュ時間帯に発生しやすく、問題となっている。

ダイヤ乱れ発生時は先行列車の遅延が発生し、先行列車に接近することによって、ATC現示(先行列車の位置に応じて決まる、ATCが列車に対して指示する制限速度)が通常より低くなるため、事前に設計したパターンどおりに走行できなくなる。さらに、ATC現示は先行列車と自列車の位置に応じて動的に変わるため、予測困難である。

仮に、先行列車の現在の位置・速度・今後の予測走行パターンが取得可能であれば、ATC現示の変化が予測でき、消費電力量について最適な走行パターンを設計可能と考えられる。しかし、現実にはこれらの情報は車上に伝送されていない。また先行列車の挙動は、さらにその先々の列車の挙動や乗客乗降時間などに影響されるため、正確な走行パターンを予測することも困難である。このため、現在取得できる情報に応じた走行パターンの最適化を検討する必要がある。

2.3.2 予告信号の活用

このような問題に対し、ダイヤ乱れ時のATOの省エネルギー化について、東京地下鉄株の協力の下で開発を進めている。東京地下鉄株のATCシステムでは、予告信号と呼ばれる情報を列車に対して送信している。鉄道では線路をある区間ごとに分割し、一つの区間に同時に複数の列車が入らないよう保安信号装置(ここではATC)で制御して安全を確保している。予告信号とは、一つ前方の区間におけるATC現示が、在線中の区間における現示よりも低いときに、ATC信号に重畳して列車に伝えられる信号である(図2)。

予告信号を受信したときには、その先でATC現示が低く変化し、減速することが予測されるため、あらかじめ無駄な加速を抑制し、惰行を有効活用することによって、若干の走行時分増加と引き替えに、消費電力量削減・乗り心地向上を実現することが可能である。ただし、加速を抑制しすぎると、走行時分が過剰に悪化するおそれがある。これはその列車の走行時分だけの問題にとどまらず、後続列車に対するATC現示が更に低く変化し、一層のダイヤ乱れを誘発するという点で大きな問題である。また、予告信号を受けたとしても、先行列車の挙動によっては、次の軌道回路に到達する前に予告信号が消去されてしまう可能性もあり、その場合は、加速抑制が無意味になるばかりか、走行時分増加という副作用だけが残る結果となる。これらのことから、予告信号を受けたタイミングや位置などを基に、適切な加速抑制度合いを調整する必要がある。

2.3.3 シミュレーションによる評価

予告信号を活用した場合に、現行ATOと比較してどの程度消費電力量が改善されるか、シミュレーションによって評価を行った。シミュレーションでは2分間隔で走行する2列車のうち、先行列車がある駅で30秒余分に停車した場合の、後続列車の走行パターンを評価した。その結果を表2並びに図3に示す。これらの結果から、消費電力量が1.0kWh分改善できていることがわかる。定常時からの消費電力量増加分で比較すると、62%の改善となっている。また、無駄な加減速が解消されたことによって、乗り心地も改善されている。一方で、消費電力量・乗り心地改善のトレードオフとして、走行時分が1.2秒だけ増加している。

3. TIMS/TISにおける省エネルギー化の取り組み

車両情報統合管理装置TIMSや車両情報制御装置TISは、車両の各機器の状態のモニタリング機能や、制御指令の伝送、そして編成での最適制御を司(つかさど)るシステムとして普及が進んでいる。TIMSやTISでも、省エネルギー化に貢献する機能の要求が大きくなってきている。ここでは、現状実現している機能に加え、実現に向けて検討中の機能を含めて述べる。

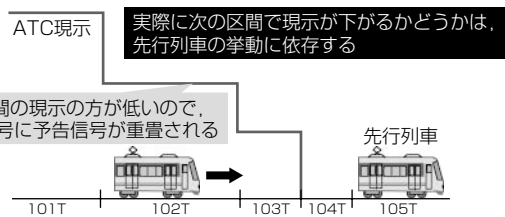


図2. 予告信号

表2. 消費電力量と走行時分の比較

	消費電力量(kWh)	走行時分(秒)
定常時	9.2	150.7
現行ATO(乱れ時)	10.8(+1.6)	162.0(+11.3)
予告活用ATO(乱れ時)	9.8(+0.6) (62%改善 ^(注2))	163.2(+12.5)

(注2) 定常時からの増加分についての比較

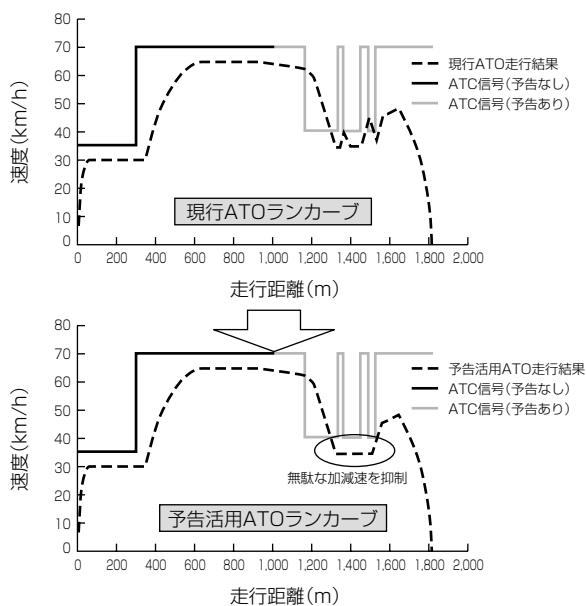


図3. ランカーブの比較

3.1 配線削減による省エネルギー化

TIMSやTIS導入の一つの目的として、車両内配線の削減が挙げられる。指令や情報伝達のための引き通し配線を、各車両のTIMS/TIS端末間での伝送に置き換えることで配線を削減してきた。配線の削減によって、コスト削減効果や車両製作工程の短縮効果以外に、車両質量が軽減されることによる力行時の消費電力量削減に大きな効果が得られている。

3.2 編成制御による省エネルギー化

TIMS/TISでは、編成単位でのブレーキ制御を実現している(編成ブレンディング)。ブレーキ指令時に、TIMS/TISは編成全体の必要ブレーキ力と各車両が負担すべき最適なブレーキ力を演算し、各車両の主回路制御装置(主変換装置やVVVF制御装置)から負担できる回生ブレーキ力を得て、不足分を空制ブレーキで負担するための情報を各車両のブレーキ装置に対して送信する。必要ブレー

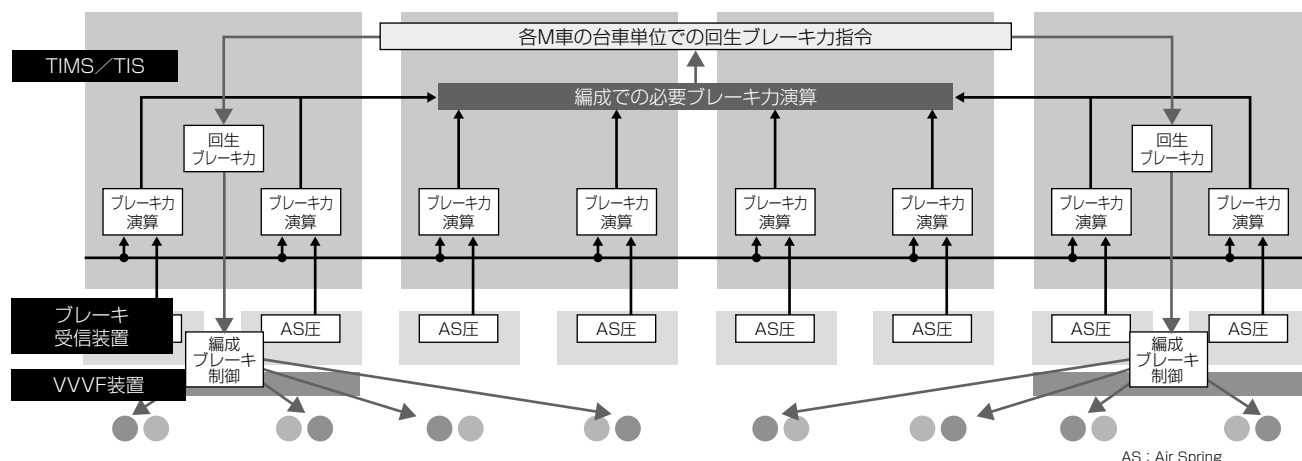


図4. TIMS/TISによる編成ブレンディング

キ力に対し、各車ばらばらではなく、編成として無駄のない制御を行うことで、回生ブレーキの利用効率を最大化できる(図4)。

一方で、実用化はされていないが、ブレーキと同様に編成での制御の考え方を力行についても応用し、省エネルギー走行を行うことも可能と考えられる。主回路制御と連携し検討を進めたい。

3.3 消費電力量の記録による省エネルギー走行支援

TIMS/TISは、走行時に積算電力を記録する機能を備えている。この機能は主回路での走行エネルギーの削減検討に役立っている。主回路制御装置で、瞬時値としての消費電力は把握されるが、データとしての記録容量に制限があり、また編成全体での記録ができないため、TIMS/TISでの記録が求められている。現状、標準的な仕様として編成としての積算電力量をkWh単位で記録しているが、省エネルギー走行支援機能で必要に応じ取得する消費電力量データの詳細化を図る。

一方、2章で述べたATOでの走行と同様、運転士による運転で省エネルギー走行を実現するためには、省エネルギーの意味での理想的な走行パターンに近づけることが必要である。そのため、走行時の消費電力量の記録や理想的な走行パターンとの差異を運転士に示すといったことが考えられる。これを含め、運転士の省エネルギー走行を支援する機能について検討中である。

3.4 回生ブレーキ中のコンプレッサ制御

一般的に、ブレーキ用コンプレッサ(空気圧縮機)では、空気圧が規定値以下の状態に達すると起動するようになっている。走行中のブレーキ動作では回生ブレーキを活用できるが、駅停車直前からは空制ブレーキを使用し、空気消費が増加するため、駅停車中にコンプレッサが起動する頻度が高く、その際走行中に発生する回生エネルギーを活用できていないのが現状である。

TIMS/TISが主体となり、停車駅間での空気圧の消費

を予測し、回生ブレーキ作用中に規定圧に達していない場合にコンプレッサを起動させる機能について検討中である。

3.5 地上・車両間連携による省エネルギー化の実現

地上変電設備に電力貯蔵デバイスを設置し、他の走行車両で利用できない回生エネルギーを吸収するシステムや、車両に電力貯蔵デバイスを搭載し架線に返せない回生エネルギーを吸収するシステムが試行されている。これらのシステムが鉄道システムとして省エネルギー効果を最大限に生み出すためには、現状の架線電圧や電力貯蔵デバイスの状態のみを判断条件とした個々の制御ではなく、地上システム、各車両システムの電力貯蔵デバイスの状態や各車両の位置をも勘案した全体での最適制御が必要となる。TIMS/TISが各車両の情報を統括し、さらに無線インフラを標準搭載することで、地上システムとリアルタイムで接続され、全体の最適制御を実現していくことが可能となる。

現状ではそれぞれの要素技術が開発されている状況であるが、将来的にはこのような鉄道システムの実現に貢献したい。

4. む す び

列車運転制御における省エネルギー化をテーマに、ATOとTIMS/TISにおける取り組みについて述べた。環境に対するニーズは今後より一層高まることが予想される。今後も環境に優しい鉄道システムを実現するため、鉄道事業者と協力しつつ、個々の装置のみならず運転制御の観点からも省エネルギー化に取り組む所存である。

参 考 文 献

- (1) 飛岡正己：無人運転システム，電気学会誌，119，No.3，156～159（1999）
- (2) 田部典之，ほか：省エネで電車を運転する，RRR，60，No.6，6～9（2003）