

ATS-P を想定した自動加減速制御のための 運転パターン作成手法

田中 峻一* 中澤 幸弘**

Calculation Method of Train Tuning Pattern for Automatic Acceleration/Deceleration Control based on ATS-P

Shunichi TANAKA Yukihiro NAKASAWA

One-person operation in urban rail lines has been expanding in recent years, but since it places a heavy burden on drivers, support such as semi-automatic operation is required. Therefore, we proposed a system configuration and driving method for semi-automatic operation based on the ATS-P section. In the proposed method, the renewal of ground facilities is minimized, and the system can be introduced on a vehicle-by-vehicle basis. In addition, the proposed system does not require detailed notch adjustment and can control running time according to the arrival time. By simulation, it was confirmed that the error of running time was within a few seconds with the proposed operation method.

キーワード：半自動運転，目標速度，ATS-P，運転曲線，駅間走行時分，運転パターン

1. はじめに

近年，ホームドアの設置やホーム監視装置の普及に伴い，都市部における列車のワンマン運転が拡大している。ワンマン運転では，運転士によるドア開閉や発車前後におけるホーム上の安全確認を行う必要があるが，都市部では長大編成の列車も多く，運転士の負担が増加している。

そのため，運転士の負担軽減効果と安全性の向上を目的として，ATO（自動列車運転装置）が導入されているワンマン運転区間もある¹⁾。特に乗降客の多い都市部ではこのような自動加減速制御を行う仕組みを導入することが望ましいが，既存のシステムからATOへの移行を行うためには，線区全体のシステムを一斉に切り替える必要がある。したがって，設備の変更や車両システムの更新にかかるコストや期間が大きく，特にATS区間においてはより顕著な課題となっている。

また，運転士は到着時刻と線路形状に加え，乗車率や架線電圧等の走行環境や車両性能の個体差等を考慮しながら，その状況に応じた運転が求められている。一般的なATOにおいては，予め用意された運転曲線に従い運転が行われるが，運転曲線に沿った運転をするためには，連続的な速度照査による細かなノッチ調整が必要となる。加えて，到着時刻に合わせる走行時分の調整を実施するためには，複数の運転曲線を予め用意することや列車動特性モデルの定期的な更新の仕組み等で対応する必要がある²⁾³⁾。

そこで，ATS-Pの区間を対象に，地上設備の更新を最小限としつつ車両単位での更新・導入が可能な，自動加減速制御を行うシステムの構成と，頻繁なノッチ調整を必要とせずに到着時刻に合わせた走行時分で自動加減速制御を行うための運転方法を検討した。本稿では，システム構成，運転方法，およびシミュレーションにより検証した走行時分調整機能の結果について報告する。

2. 想定するシステム構成

2.1 システムの前提条件

ワンマン運転において，列車の加減速は自動で制御し，列車の出発や線路上の支障を検知した場合の非常停止は運転士が操作することを想定した。また，駅停車時の定位置停止のための調整は既存のTASC（定位置停止制御装置）を活用することとし，地上一車上間の無線伝送については，駅停車時での伝送のみを必須とし，駅間において伝送ができない場合にも自動での加減速制御を継続できることを条件とした。

2.2 システムの概要

既存車両の改修を想定した場合，頻繁なノッチ操作やフィードバック制御，加減速度を指定した制御が必要となる運転方法は望ましくないため，従来からのATO装置と同様に，照査速度を超過した場合に所定のブレーキが動作し，照査速度から十分低い速度となった場合に力行するような制御が望ましい。

そこで，図1に示すように線区最高速度及び速度制限を超えない範囲で目標速度（水色実線）を設定し，加速時は目標速度まで力行を行い，減速時は目標速度を超過

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

** 信号・情報技術研究部 列車制御研究室（現 東海旅客鉄道株式会社）

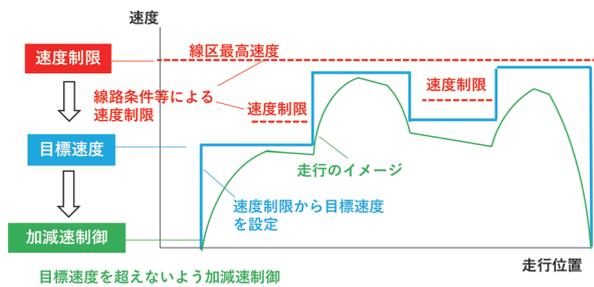


図1 目標速度に従った制御イメージ

しないような速度照査パターンを発生させてブレーキ制御を行う運転方法を提案する。この方式では、目標速度を変化させることにより、複雑な制御を行うことなく、走行時分を調整することが可能となる。

走行時分を調整する運転方法の詳細を3章にて、ATS-Pを用いて自動加減速と提案の運転方法を実現するためのシステム構成の詳細を4章にて述べる。

3. 状況に応じた運転方法

3.1 手法の概要

提案する運転方法の基本的な動作は、車上に保持した最高速度（出発から到着までの各地点における制限速度から余裕幅を下げた速度）に対する割合（以下「目標速度率」という）で計算される速度を目標速度とし、加減速制御を行うものである。具体的には、目標速度を制限速度とみなすような運転を行うこととし、目標速度が下がる箇所以外は、現在の速度と目標速度を比較して、現在速度が低ければ加速、目標速度付近では定速の制御を行うこととする。定速制御が備えられていない場合は、一定速度幅で惰行と加減速を繰り返すいわゆる「ノコギリ運転」を行う。

走行時分を調整するため、出発時と駅間であらかじめ指定してある走行時分の評価地点（以下「評価地点」という）において残りの走行時分を評価し、残りの走行時分に対して目標速度率を動的に変化させる。目標速度率が増加した場合には現在速度が一時的に目標速度を上回ることがありうるが、その場合は目標速度を下回るまで減速するものとする。

なお、評価地点は、車上で認識できる位置検知誤差ができる限り小さいことが望ましいため、地上子等により位置補正が可能な地点であることを想定している。また、信号現示による減速は、信号現示に応じた減速パターンが設定されるものとする。

3.2 目標速度率ごとの走行時分の計算（事前準備）

走行前の事前の準備として、目標速度率を決定する基準となる時分を計算し、「走行時分表」を作成する。

表1 目標速度率ごとの走行時分表の計算例

(a) 出発から到着までの走行時分

	出発から到着までの目標速度率					
	100%	90%	80%	70%	60%	...
出発時	168秒	178秒	192秒	209秒	242秒	...

(b) 評価地点Xから到着までの走行時分

		評価地点Xから到着までの目標速度率					
		100%	90%	80%	70%	60%	...
出発から 評価地点X までの目 標速度率	100%	122秒	132秒	147秒	161秒	189秒	...
	90%	122秒	132秒	147秒	161秒	189秒	...
	80%	124秒	135秒	146秒	161秒	189秒	...
	70%	124秒	132秒	146秒	163秒	191秒	...
	60%	125秒	133秒	149秒	165秒	194秒	...
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

まず、すべての取りうる目標速度率で駅出発から駅到着までに一定の目標速度率で走行したときに要する走行時分を計算する。次に、各評価地点に対して、駅出発から評価地点までと評価地点から駅到着までのそれぞれで目標速度率が異なる場合の運転曲線を計算する。各評価地点に対し、評価地点通過以前と以後の目標速度率の組合せに対し、評価地点通過から駅到着までの走行時分を算出する。走行時分表の例として、目標速度率を10%刻みで設定した場合の計算結果の例を表1に示す。

3.3 目標速度率の決定（運転時処理）

目標速度率は出発時点および評価地点通過時に更新を行う。出発時刻は現在の運行状況に基づき、到着目標時刻は列車ダイヤの到着時刻とする。到着目標時刻と出発時刻との差を、指定する駅間の走行時分とし、事前準備の出発から到着までの走行時分計算において、指定時分に最も近い時分で走行できる速度目標率を選択する。例えば、事前の計算の結果、表1(a)が得られたときに、計画通りに駅を出発したときの駅間の走行時分が190秒である場合、最も近い時分である192秒の80%の目標速度率が選択される。

評価地点通過時は、現在時刻と到着目標時刻に基づき、駅到着までの残りの走行時分を算出し、事前計算の該当する評価地点で目標速度率が変化したときの走行時分計算において、残りの走行時分に最も近い時分で走行できる目標速度率に更新する。例えば、表1(b)が事前計算によって得られており、評価地点通過前まで80%の目標速度率であったときに、残りの走行時分が162秒である場合、80%の行の中で最も近い時分である161秒に対応する70%の目標速度率に更新される。

その後も評価地点を通過する度に、その地点から到着目標時刻までの走行時分とその評価地点で事前計算を行った走行時分表を参照し、最も近い走行時分の目標速度率に更新を繰り返し、駅到着まで走行する。

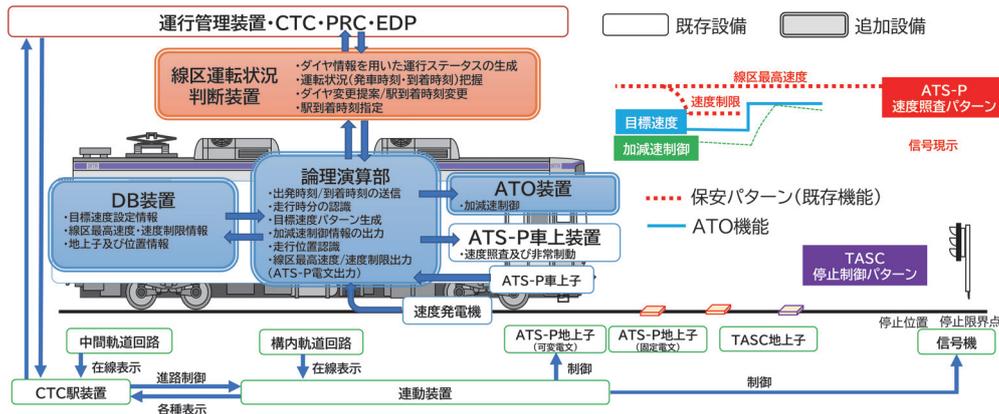


図2 システム構成概要

4. ATS-P で実現するための構成

前章で提案した運転方法を自動加減速制御として実現するための方法として、既存のATS-Pをベースとした場合のシステム構成について検討を行った。

4.1 システムの機能要件と構成

提案の運転方法を実現するためには、運行状況から指定する走行時分を算出する機能、指定された走行時分と速度制限の情報から目標速度を設定する機能、目標速度に基づき加減速制御を行う機能が必要となる。また、全ての速度制限の制限速度・区間の情報を管理するデータベースが必要となる。これらの機能要件を満足するシステム構成を図2に示す。地上には、運行管理装置、CTC（列車集中制御装置）、PRC（自動進路制御装置）、EDP（ダイヤ管理システム）などから情報を受信して対象線区内の運転状況を把握し、目標到着時刻の指定を行う線区運転状況判断装置を設ける。車上には、目標速度を設定する論理演算部、速度制限の情報を管理するDB（データベース）装置、目標速度に基づいて加減速制御を行うATO装置を追加する。

4.2 速度照査パターンの生成

一般に、線路の条件に応じた速度制限については、必ずしも全ての箇所ですべての速度照査パターンによる防護を行っているわけではない。

そこで、走行線路上のすべての速度制限に対して速度照査パターンを与えるための仕組みとして、通常は地上子のみから送信するATS-P車上装置への電文入力を、DBからも送信する方法¹⁾を採用することとした。速度照査パターン生成の機能ブロックを図3に示す。地上子が設置されている速度制限に対する速度照査パターンは従前のATS-Pと同様に地上子より電文を受信することでパターン生成を行う。また、地上子が設置されていない区間の速度制限に対する速度照査パターンは、車上に

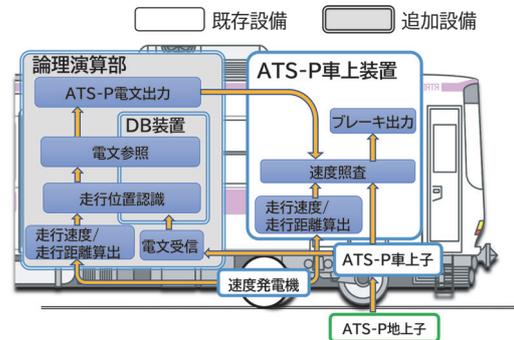


図3 速度照査パターン生成

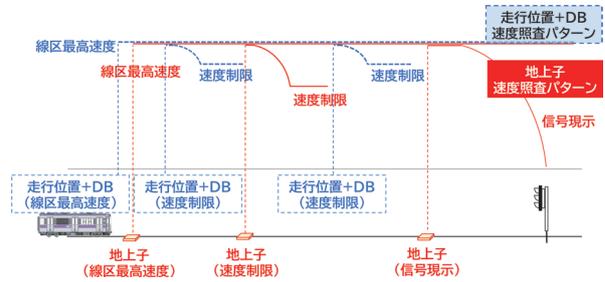


図4 速度照査パターンの出力

おける走行位置認識に基づき、DB装置に登録された電文情報を論理演算部からATS-P車上装置へ出力することで、走行線路上のすべての速度制限に対応する。

速度照査パターンは、地上子から受信する電文、走行位置およびDBを用いて車上論理部から出力される電文のそれぞれに対応して、生成される。図4の赤線は地上子による速度照査パターンであり、青い点線は走行位置およびDBによる速度照査パターンである。なお、異なる速度制限が極めて短い離隔で連続する場合においては、電文更新によって必要な速度照査パターンが消去されるおそれがある。このため、実用化するには、改修するATS-P車上装置のパターン生成方法、速度制限が連続する場合のDB登録方法などを整理する必要がある。

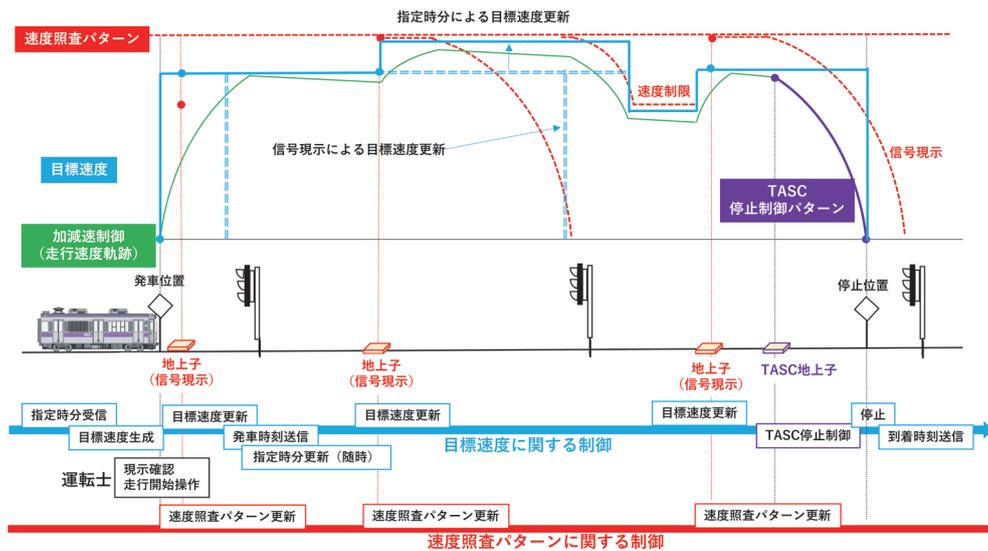


図5 ATIS-Pで実装した場合の制御イメージ

4.3 走行位置の認識

ATO機能による加減速制御、DBによる速度照査パターンを実現するためには、論理演算部が線路上の走行位置を認識することが必要である。このため速度発電機および既存のATIS-P地上子を用いて走行位置を認識する方法を示す。

既存のATIS-Pは、速度発電機パルスを用いた速度算出および速度積算による走行距離算出を行っている。この速度および走行距離は、速度照査に用いられているが、ATIS-Pは停止限界点や速度制限の開始点を基準とした相対距離の概念で制御を行っているので、ATIS-P車上装置は、どの位置を走行しているか絶対位置を認識していない。また、デジタルATCや無線式列車制御システムでは、速度発電機パルスを用いて距離積算を行い、地上子を用いて位置補正することにより走行位置認識が行われている。しかし、ATIS-P地上子には、個々の地上子を識別するための情報がないため、地上子の識別情報と走行位置を直接紐づけて位置補正することができない。そこで、ATIS-P地上子の電文内容の一致を確認することで、間接的に個々の地上子を認識して走行位置補正を行うこととした。

この補正では、走行位置から次に通過する予定の地上子の電文内容をDB装置よりあらかじめ取得しておく。走行により地上子から電文を受信すると、受信電文と事前に把握していた電文の比較を行い、一致が確認できた場合に、DB装置に登録された地上子の位置情報により走行位置補正を行う。ただし、同一の電文情報が連続する可能性がある場合は、走行位置を誤認するおそれがあることから、位置補正を行わない。なお、この補正を行うためには、初期位置の確定を行うことが必要である。初期位置の確定方法として、位置を識別する情報や条件

を自動加減速制御の開始区間前に運転士がシステムに入力する方法、ATIS-P地上子の拡張電文機能を用いて地上子個体を認識する電文情報を持たせDBを参照することで位置を特定する方法、GNSSを用いて位置情報を取得して位置を特定する方法等が考えられる。

4.4 列車ダイヤの管理

列車ダイヤ情報は、中央設備である運行管理装置で管理される。遅延時には、運行状況に応じて動的な変更が反映された着発時刻を列車ダイヤ情報として使用する。

列車ダイヤ情報を列車が取得し、実績の着発時刻を中央設備に送信する仕組みは、駐車場の進路制御を行う連動装置から信号、軌道回路、鎖錠等の条件を出力し、これらの条件をCTC装置経由で線区運転状況判断装置に取り込み、到着、出発を検知して到着時刻、発車時刻を確定させることで運転状況を把握することとした。

4.5 目標速度に応じた列車走行手法

列車走行制御手法の全体の制御イメージを図5に示す。以下、出発時、走行中、停止時に分けて説明する。

(1) 駅出発前の目標速度の設定

駅に停車している各列車は、線区運転状況判断装置から受信する運行状況と運行管理装置から受信する着発時刻の情報から駅間走行時分を算出し、全ての信号が最高現示である前提で、現在停車位置から次の停止位置までの目標速度を生成する。これとは別に、既に受信しているATIS-Pの電文を用いて前方の信号現示を認識し、信号現示に応じた減速パターンが発生することとする。これらの減速パターンと目標速度の組合せにより加減速制御を行う。

(2) 列車の出発操作と走行中の目標速度の更新

運転士が信号現示を確認し、走行開始操作を行うことで、列車は目標速度に従って自動的に加減速制御される。論理演算部は、発車時刻を線区運転状況判断装置へ送信する。

列車走行中はATS-Pの電文更新用地上子もしくは信号機の直下地上子を通る地点を評価地点とし、速度照査パターンを更新するとともに、次駅到着予定時刻までの走行時分に基づく目標速度と信号現示に基づいて運転目標速度を更新する。

(3) TASCによる駅停止制御

駅の停止制御には、TASC停止制御パターンにしたがって定位置へ停止する。論理演算部は、停止後に到着時刻を線区運転状況判断装置へ送信する。

5. シミュレーションによる検証

提案の制御方法による走行時分調整の精度を確認するために、提案手法の走行を模擬するシミュレータを開発し検証を行った。シミュレータ内での運転曲線の計算は、一般的な速度査定業務で用いられる運転理論⁴⁾に準じ、加速時には最大ノッチを使用するものとし、ブレーキは途中ブレーキと停止ブレーキのそれぞれで減速度一定とする簡易的な方法とした。また、簡易化のため評価地点を通過すると同時に目標速度が更新されるものとし、計算や機器応答にかかる時間は考慮していない。

5.1 対象とした区間

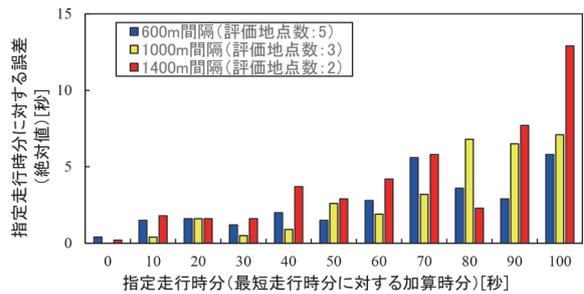
検証には、一般的な路線を模した線区で距離が異なる区間A、区間Bの2つの区間（停車駅間）を使用した。それぞれの区間における特徴を表2に示す。なお、いずれの区間も線区最高速度は100km/hであり、途中で複数の速度制限が存在する。

5.2 評価地点の間隔による影響

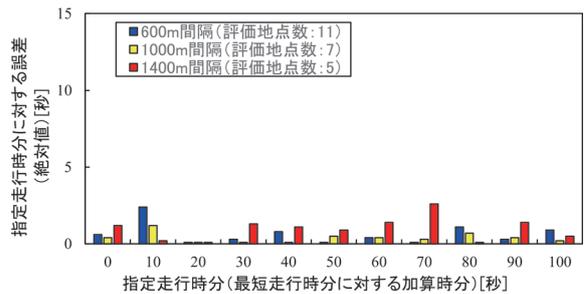
最初に、指定走行時分と提案手法でシミュレーションした走行時分の差（以下「指定走行時分に対する誤差」という）について、評価地点の間隔を変えた場合の影響を確認した。選択可能な目標速度率は100%から10%ずつ減少させた値（最低速度の20km/hになるまで設定する）とした。最初の評価地点が駅出発地点から200mの地点にあるものとし、その後の評価地点までの間隔を

表2 検証に用いた区間の特徴

	駅間 距離	勾配	最短走行時分 (10秒単位切上げ)
区間A	3.0km	-10%~10%	2分40秒
区間B	7.0km	-10%~10%	5分20秒



(a) 区間A



(b) 区間B

図6 評価地点の間隔による走行時分の誤差の違い

変化させて指定走行時分に対する誤差を確認した。その結果を図6に示す。横軸に指定走行時分（最短走行時分に対する加算秒数で示す）、縦軸に指定走行時分に対する誤差（絶対値）を示す。

必ずしも評価地点の間隔が短いときの方が指定走行時分に対する誤差が小さいとは限らず、一定数の評価地点がある場合、間隔の変化に対する指定走行時分の影響は小さいと考えられる。

5.3 目標速度率の刻み幅による影響

前節の結果から、区間Bにおいては数秒以内の誤差で走行することが確認できたが、区間Aにおいて指定走行時分を増大させたときに誤差が大きくなることがわかった。

図7に出発から到着まで同一の目標速度率で走行したときの走行時分の違いを示す。この図から目標速度率が低いほうが走行時分の変化量が大きいことが分かる。目標速度率が低いと、目標速度付近の速度で走行する距離が長くなるため、目標速度率の変化で影響のある距離が長くなり、指定走行時分との誤差が大きくなったと推察される。区間Bでは、指定走行時分を増大させても誤差が増大する傾向は見られなかったが、目標速度率と走行時分の関係は、区間Aと同様の傾向を示していることから、さらに指定走行時分を伸ばした場合には誤差が拡大することが予想される。そのため、最短の走行時分に対して一定以上の長い走行時分を想定する場合は、目標速度率が低い範囲において、より細かく目標速度率

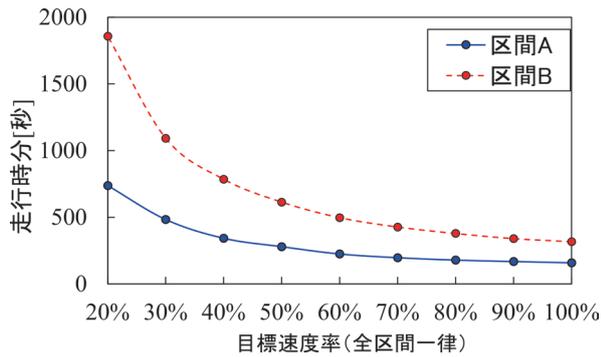


図7 目標速度率と走行時分の関係

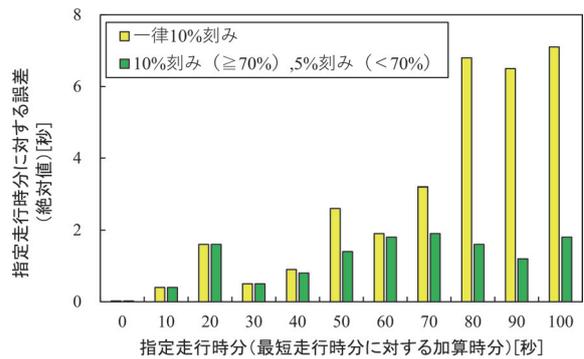


図8 目標速度率を変えたとき走行時分の誤差

を区切る必要がある。

そこで、指定走行時分を伸ばすにつれて誤差が悪化した区間 A の 1,000m 間隔に評価地点を設定し、目標速度率の 70% 以下の刻み幅を 10% 刻みから 5% 刻みに変更 (70% 以上は 10% 刻みのまま) したときの検証を行った。

結果を図 8 に示す。10% 刻みでは誤差が増大した指定走行時分においても、2 秒以内の誤差で走行していることが確認できる。このことより、十分な精度で走行するためには、区間と指定走行時分の範囲に応じて適切に目標速度率の刻み幅を設定する必要があることがわかった。

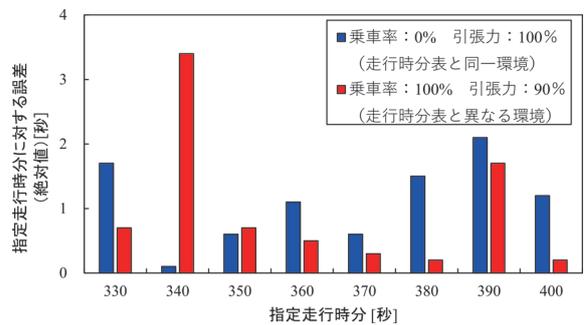


図9 走行環境の違いによる誤差時分の比較

5.4 走行環境による影響

実際の走行時には、乗車率や架線電圧の変化等の走行環境により、走行時分表の作成時の運転曲線とは異なる運転をせざるをえない状況が発生し、事前に想定した通りの走行が難しいことがある。しかし、提案手法は、目標速度の更新のタイミングで、残りの時分に応じた目標速度率を変化させることで、走行時分のずれを吸収することが可能であり、走行環境による影響を抑えることができると考えられる。

そこで、走行時分表の作成時と実際の走行時とで走行環境が異なった際に、走行時分の誤差に影響が生じるかをシミュレーションで確認した。シミュレーションは、区間 B において、評価地点の間隔を閉そく長に応じて 568m~1,016m とし、合計 7 か所の評価地点を設定した。走行環境として、走行時分表作成時には乗車率 0% とし、実際の走行シミュレーション時には乗車率 100% としたうえで、架線電圧が下がった場合を模擬しモーターの引張力を 10% 低くして検証を行った。

その結果、乗車率 100%・引張力 10% 減の場合も、3 秒台までの誤差に収まっており、走行時分表作成時と同一環境の場合と同程度の誤差であった (図 9)。したがって、走行環境が変わっても走行時分の精度に対する影響はほとんどないことを確認した。

6. まとめ

ワンマン運転における運転士の支援を目的として、ATS-P 区間において自動で加減速制御を行うための運転方法と、地上子の位置や機能の変更を行わない ATS-P による自動運転でのシステムの構成を提案した。また、提案の運転方法は、予め指定された走行時分に対し、数秒以内の誤差で走行が可能であることを確認した。

今後の課題として、半自動運転を行うための具体的な各制御装置の実装方法や、動的な着発時刻の変更が可能な運行管理手法など、実用に向けたより詳細な検討が必要と考えられる。

文献

- 1) 古関隆章：鉄道自動運転技術の動向，電気学会誌，Vol.140, No.5, pp.303-306, 2020
- 2) 水間毅：鉄道における自動運転の歴史と今後，計測と制御，Vol.56, No.2, pp.93-98, 2017
- 3) 大矢純子，宮島康行，中澤弘二：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，Vol.17, No.5, pp.21-25, 2011
- 4) 運転理論研究会：運転理論（再改訂版）—基礎知識と応用実務—，日本鉄道運転協会，2010