

線区条件に応じた列車群の予測制御方式

平栗 滋人* 兎束 哲夫**

Train and Traffic Prediction Control Method Adapted to Line Conditions

Shigeto HIRAGURI Tetsuo UZUKA

We had proposed previously a train control method named “prediction control”. The method aims to prevent undesirable deceleration or stop of trains between stations in a high-density line and to control train’s speed appropriately, based on the prediction of the train movement and data communications. However, this proposed method was based only on the basic conditions. Therefore, we have now proposed a new control method adapted to turn-back and passing operation. We have evaluated a performance of the method by traffic simulation, and as a result confirmed that the method can reduce opportunities of train stop between stations and power consumption at sub-stations. On the other hand, it has been clarified that an ability of recovery from train delay depends on relationship between the possible minimum headway and the scheduled train interval.

キーワード：予測制御，列車群制御，運転制御，遅延回復，省エネルギー

1. はじめに

現在、いわゆる閑散線区から高密度線区まで、環境や輸送需要に応じて様々な形態の列車運行が行われている。これらの内、ダイヤ上の列車間隔が数分程度であるような線区では、乗客の混雑が発生し、列車が計画された時間より長く駅に停車すると、この影響が後続の列車に波及し、駅に向かう列車が途中で一旦停止に至る場合がある。また、このような高密度線区は大都市圏の通勤線のみならず、長距離、高速運転を行う場合にも存在する。

先に我々は、このような課題を解決するための方法として、先行する列車の運転状況に応じて、できるだけ短い運転時隔を確保すると同時に、駅間での不要な停車を回避するような予測制御と呼ぶ列車制御方式¹⁾を提案した。また、計算機シミュレーションによって、この方式が列車遅延による影響の早期回復、および省エネルギーに効果のあることを示した。

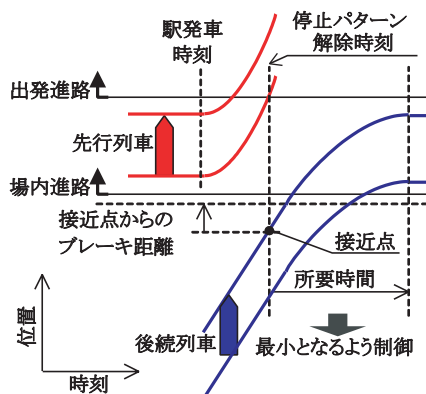
上記の提案では、駅の種類はいわゆる棒線駅のみで、全ての列車は各駅に停車することを前提としていた。しかし、現実には副本線を持ち、待避・追越を行う駅、折返しを行う端末駅などが存在する他、列車が駅を通過する場合もある。そこで、先に提案した基本的な制御方法に基づいて、上記のような線区条件に適応する制御方法について検討した。本稿では、この制御手法について述べるとともに、計算機シミュレーションによる検証結果を示す。

なお、予測制御方式の実現には、地上一車上の双方向で進路開通予測時刻や、次駅到着予測時刻を交信する必

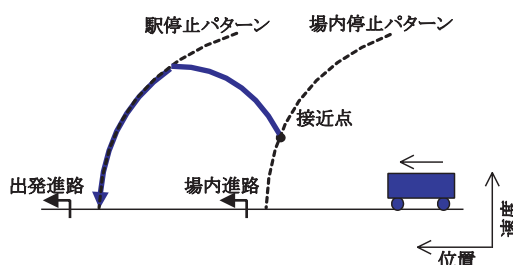
要があるが、情報伝送媒体（LCX）や運行管理システムが整備されていることを考慮して、本稿では新幹線を想定したモデルを設定した。

2. 予測制御方式の考え方

予測制御の概念を図1に示す。なお、本稿では、信号方式としては、レールを利用したデジタル情報伝送に



(a) 時刻と位置の関係



(b) 位置と速度の関係

図1 予測制御の基本概念

* 信号通信技術研究部（信号）

** 電力技術研究部（き電）

特集：信号通信技術

よって一段ブレーキ制御を実現するデジタル方式のATCを前提とした。

場内進路に対する停止パターン上の解除予測時刻(出発する列車が駅構内から進出する時刻)は、先行列車の駅出発時刻の予測に基づいて求められ、後続列車に与えられる。このとき、停止パターンが解除されてから駅到着までの走行パターンが決っていれば、パターン解除から駅到着までの時間が最小となるような点(位置、速度)が停止パターン上に存在する。予測制御方式では、この点を接近点と呼んでいる。接近点は車両性能、線路条件などからあらかじめ定めておくことが可能である。

3. 線区条件に適応した予測制御

2章で述べた考え方は、全ての列車が停車する棒線駅を対象として、場内進路が運転時隔上のボトルネックとなる場合を前提とした基礎的な制御方法である。本章では、この考え方を基本として、待避・追越設備を持つ駅、折返し駅などの駅の条件や、通過列車の存在などの条件を考慮した制御方法について、適当に設定した駅や列車ダイヤなどのモデルを用いて、制御のための接近点の設定や制御方法について述べる。

3.1 折返し駅における予測制御

本稿で使用する折返し駅のモデルを図2に示す。このような駅では先行列車の運転方向が変わったり、進路の交差支障があるため、進路開通時刻の予測は棒線駅よりも複雑となるが、全ての列車が停車するため、予測制御の対象は場内進路とする。したがって、2章で述べたものと同じ考え方で制御を行えば良い。場内進路の停止パターン上の接近点については、パターン消去から駅到着までの時間が最小となる地点を到着番線ごとに設定する。また、列車は走行路上の各軌道回路の進出時刻を予測し、これらと定められた列車の着発順序に基づいて場内進路の開通時刻を予測する。

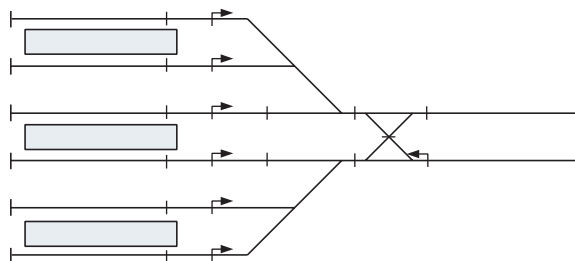


図2 モデル駅(折返し)

3.2 通過列車のある棒線駅における予測制御

3.2.1 予測制御の対象進路の設定

棒線駅における基本的な制御方法は、2章で述べたとおりであるが、ここでは通過列車が存在する場合につい

て述べる。

モデル駅の閉そく区間の構成を図3に、列車の運行パターンを図4に示す。表1に各運行パターンに対する、閉そく区間ごとの運転時隔の例を示す。ここで、各閉そく区間に対応する時隔の値は、閉そく区間における時隔を駅到着(通過)時に換算したものである。

表1に示すように、モデル駅近傍での閉そく区間の構成では、列車の運行パターンによって、場内進路以外の箇所の時隔が大きくなり、ボトルネックとなる場合がある。そこで、このような場合には、先行と後続の列車の組合せに応じて予測制御の対象とする進路を設定、選択することとした。表2に、モデル駅での先行列車との組合せに対する予測制御の対象進路を示す。ここで、対象とした進路は必ずしも時隔が最大の箇所ではない。これは、予測制御の対象進路を駅から大きく離れた箇所とすると、更に後続の列車運行に影響することが想定されるため、できるだけ駅に近い進路を対象として設定したことによる。



図3 モデル駅(棒線駅)

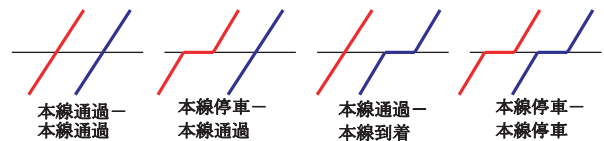


図4 列車運行パターン(棒線駅)

表1 モデル駅(棒線)の運転時隔の例

運行パターン		駅到着(通過)での時隔(秒)				
		場内	A	B	C	D
①	本線通過- 本線通過	60	62	72	72	70
②	本線停車- 本線通過	148	44	28	16	5
③	本線通過- 本線停車	90	97	116	125	129
④	本線停車- 本線停車	178	79	72	69	64

(注) 停車時間は60秒として算出。

表2 モデル駅(棒線)の予測制御対象進路

運行パターン	先行列車との関係	対象進路	運行パターン	先行列車との関係	対象進路
①	先行列車が本線通過	B	③	先行列車が本線停車	B
②	先行列車が本線停車	場内	④	先行列車が本線通過	場内

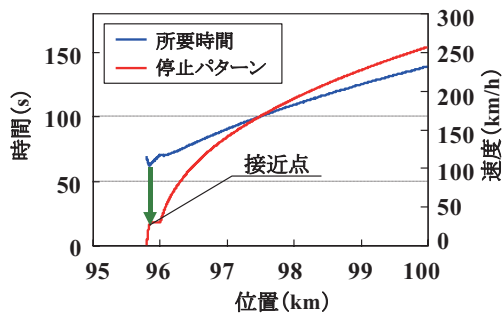
(注) 「先行列車との関係」で実線が自列車を示す。

3.2.2 停止パターン上の接近点の設定

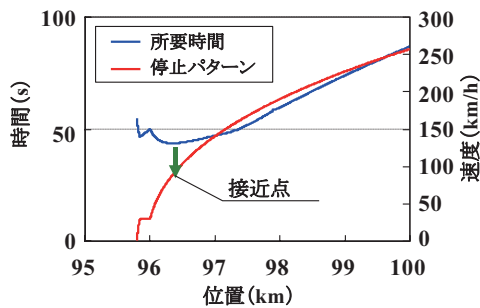
2章で述べた方法では、列車が駅に停車することを前提としていたため、停止パターン上のある地点から、駅

到着までの所要時間が最小になる地点を接近点としていた。これに対し、通過列車の場合には、さらに後続の列車の種別を考慮した接近点を複数、設定し、状況に応じて選択することとした。

図5 (a), (b) には、モデル駅における場内進路に対する停止パターンとパターン上の地点からの所要時間の関係の例を示す。例えば、自列車が本線停車で、先行列車も本線停車であれば、予測制御の対象進路は場内進路となる(表2の④)。次に、表3に示す考え方によってパターン上の接近点を定める。このときは後続列車の種別に関らず(表3の②, ④)、駅到着までの時間が最小とな



(a) 場内停止パターン上の地点から駅停止までの時間



(b) 場内停止パターン上の地点から後続列車に対する場内進路が開通する地点を進出するまでの時間

図5 接近点設定の例

表3 モデル駅(棒線)の接近点設定

運行パターン	後続列車との関係	接近点設定の基準 (予測制御対象進路の停止パターン上の地点を起点とした下記時間を最小とする地点を設定)
①		後続列車の 出発 進路が開通する軌道回路を進出するまでの時間
②		駅停車までの時間
③		後続列車の 場内 進路が開通する軌道回路を進出するまでの時間
④		駅停車までの時間

(注) 「後続との関係」で実線が自列車を示す。

る地点が接近点となる(図5 (a))。

一方、自列車が本線通過で先行列車が本線停車の場合(表2の②)にも場内進路が予測制御の対象となる。このとき、後続列車が停車(表3の③)であれば、後続に対する場内進路開通までの時間が最小となる地点が接近点となる(図5 (b))。

3.2.3 列車制御の方法

各列車は表2に示す基準によって予測制御の対象とする進路を選択するとともに、選択した進路の停止パターン上において、表3に示す基準によって接近点を設定する。なお、停止パターン上の接近点については、候補は列車の運行パターンや駅近傍の進路構成によって決るため、事前に設定しておく。また、駅に接近する列車は、予測制御対象となり得る複数の進路開通予測時刻と、先行列車の種別を受信し、自列車の種別との関係を考慮して制御対象とすべき進路の開通予測時刻を選択し、制御に使用する。

3.3 待避・追越駅における予測制御

3.3.1 予測制御の対象進路の設定

図6にモデル駅における閉そく区間の構成を、図7に列車運行パターンを示す。また、表4に出発進路が制約となる副本線発車一本線通過を除く運行パターンについての駅到着(通過)に換算した運転時隔の例を示す。

表4に示すように、ここでのモデル駅(待避・追越)の場合では、進路Aが予測制御の対象となる場合が多い。また、先行列車が副本線から発車し、その後続列車が本線を通過する場合は、出発進路の開通タイミングが制約となるため、出発進路を予測制御の対象とする。先行列

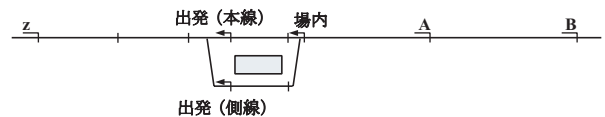


図6 モデル駅(待避・追越駅)

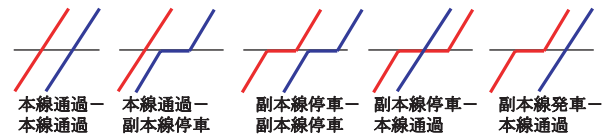


図7 列車運行パターン(待避・追越駅)

表4 モデル駅(待避・追越)の運転時隔の例

運行パターン	駅到着(通過)での時隔(秒)		
	場内	A	B
① 本線通過-本線通過	57	94	77
② 本線通過-副本線通過	116	143	140
③ 副本線停車-副本線停車	192	121	73
④ 副本線停車-本線通過	61	72	10

(注) 停車時間は60秒として算出。

特集：信号通信技術

車との組合せに対する予測制御の対象進路を表5に示す。

表5 モデル駅（待避・追越）の予測制御対象進路

運行パターン	先行列車との関係	対象進路
①		A
②		A
③		場内
④		A
⑤		出発 (本線)
⑥		Aと出発(本線) の内、開通予測 時刻の遅い方

(注)「先行列車との関係」で実線が自列車を示す。

3.3.2 停止パターン上の接近点の設定

停止パターン上の接近点の設定の考え方は、基本的には3.2で述べた棒線駅の場合と同じであるが、通過列車と停車列車では進路が異なるため、本線通過列車の場合には先行列車の種別に応じてケースが増える。モデル駅における接近点の設定を表6に示す。

表6 モデル駅（待避・追越）の接近点設定

運行パターン	後続列車との関係	接近点設定の基準 (予測制御対象進路の停止パターン上の地点を起点とした下記時間を最小とする地点を設定)
①		後続列車の 出発 進路が開通する軌道回路を進出するまでの時間
②		後続列車の 場内 進路が開通する軌道回路を進出するまでの時間
③		駅停車
④		後続列車の 場内 進路が開通する軌道回路を進出するまでの時間
⑤		後続列車の 場内 進路が開通する軌道回路を進出するまでの時間
⑥		後続列車の 出発 進路が開通する軌道回路を進出するまでの時間

(注)「後続列車との関係」で実線が自列車を示す。

3.3.3 列車制御の方法

3.2で述べた棒線駅の場合と同様に、各列車は表5に示す基準によって予測制御の対象とする進路を選択するとともに、選択した進路の停止パターン上において、表6に示す基準によって接近点を選択する。さらに、各列車は関連する軌道回路の進出時刻を予測するとともに、駅に接近する列車は自身の予測制御対象進路の開通予測時刻を選択する。

4. シミュレーションによる検証

3章で述べた、各種条件に対する制御方法について、適当にダイヤを設定した上で、複数の列車を走行させる計算機シミュレーションを実施した。

4.1 前提条件

複数の列車を走行させるシミュレーションにおいて、軌道回路などの信号設備条件や列車ダイヤについては、新幹線を想定して仮に設定した。また、車両については1種類とした。

予測制御による列車制御方式の導入効果の検証については、3章で述べたモデル駅において、ある列車を一定時間抑止した状態を設定し、ダイヤの回復状況や回復途上での列車の挙動によって評価した。また、提案する制御方法によって、不要な一旦停止の機会が減少し、消費エネルギーの低減が期待されることから、変電所の消費電力量についても評価を行った。

変電所の消費電力量については、VVVFインバータ制御で力行時の編成最大電流を約900Aと仮定して設定した速度-電流特性を用いて、列車群走行シミュレーションの結果から列車ごとの電流を得た。さらに、これらの電流値を変電所のき電範囲ごとに合計し、新幹線の標準き電電圧である25,000Vを乗じて消費電力を推定した。なお、消費電力算出においては、変電所ごとの列車電流の合計値が負の値となった場合は、電流値はゼロとして計算を行った。

4.2 シミュレーション結果

列車群走行の計算機シミュレーションは、3章で示したモデル駅において、ある列車の発車を遅延を発生させた場合を想定した。なお、駅において着発順序や番線の変更は行わない前提とした。

4.2.1 折返し駅

運転時隔の上で最も制約が大きいと推定される、図2に示すモデル駅において、列車の発車を15分間遅延させた場合の実績走行軌跡について、信号の制約の範囲内で走行し、制御を行わなかった場合を図8に、予測制御による列車制御を行った場合を図9に示す。なお、これらの軌跡は列車先頭位置を表しており、折返し駅で上りと下りの列車位置が異なっているのは、そのためである。

列車ごとの駅到着時刻のダイヤ時刻との差の推移を図10に示す。予測制御を行った場合と、そうでない場合のダイヤからの遅れ時間の差は列車ごとに徐々に拡大していき、最も大きい場合で40秒程度の差となっている。ただし、途中で差が拡大しない場合もある。これは、遅延からの回復の過程で、図8に示すように予測制御を行わない場合にも、場内手前で機外停車しない列車が幾つか存在する。これは、場内外方で行き違う下り列車の出発が早くなった結果、上り列車に対する場内進路の開通が早くなったためである。このような状況は、この下り列車の出発時に交差障害がないときに発生する。この結果として、予測制御を行った場合の、遅延からの回復は列車数にして、1列車分となった。

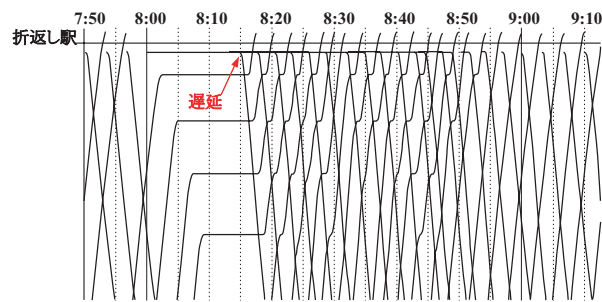


図8 折返し駅でのシミュレーション結果
(予測制御なし)

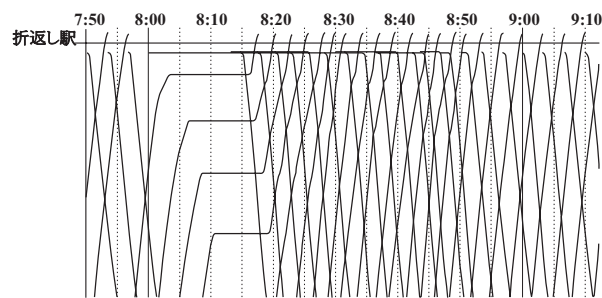


図9 折返し駅でのシミュレーション結果
(予測制御実施)

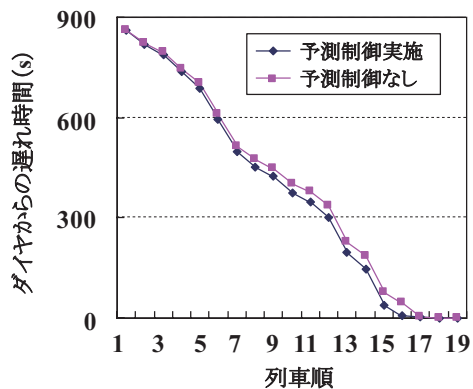


図10 ダイヤの着時刻に対する遅れ時間の推移

表7 折返し駅での遅延発生時の変電所消費電力量

	消費電力量 (MWh)
予測制御実施	55,301 (94.6%)
予測制御なし	58,469 (100%)

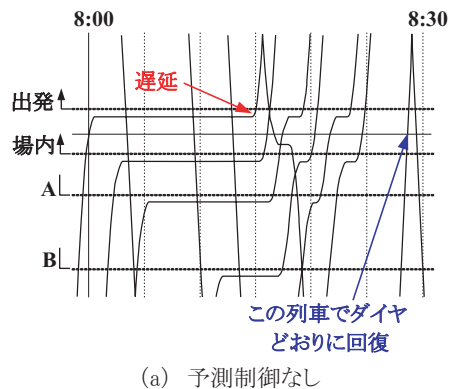
図8、図9に示すエリアをき電区間とする変電所において、遅延の影響が発生した時間帯である8:00から9:30までの消費電力量を試算した結果、表7に示すように予測制御を行った場合の方が約5%少ない結果となった。これは、予測制御の実施によって、一旦停止と加速を繰返す列車が減少したことの効果と推測される。

4.2.2 棒線駅

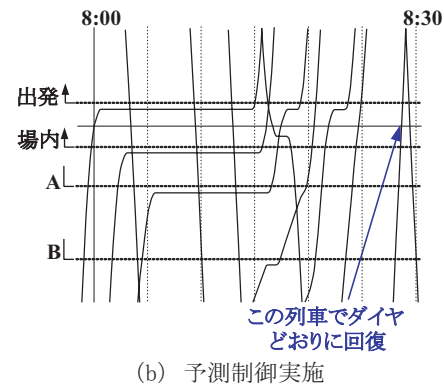
図3に示すモデル駅において、列車の発車を15分間遅延させた場合の実績走行軌跡について、信号の制約の範囲内で走行し、特に制御を行わなかった場合を図11(a)に、予測制御による列車制御を行った場合を図11(b)に示す。

駅の到着あるいは通過時刻の所定のダイヤ時刻に対する比較において、予測制御を行った場合と、行わなかった場合に殆ど差がない結果となった。これは、設定したダイヤ上の時隔が通過列車が先行の場合に180秒程度、停車列車が先行の場合には480秒程度と、表1に示した最小運転時隔に対して余裕があるために予測制御の効果が現れ難い結果になったものと考えられる。

一方、モデル駅を中心とするエリアをき電区間とする変電所において、遅延の影響が発生した時間帯を中心とする7:50から8:50の間の消費電力量を試算した結果、表8に示すように、予測制御実施時には約5%少なくなっている。



(a) 予測制御なし



(b) 予測制御実施

図11 棒線駅でのシミュレーション結果

表8 棒線駅での遅延発生時の変電所消費電力量

	消費電力量 (MWh)
予測制御実施	50,853 (95.4%)
予測制御なし	53,292 (100%)

特集：信号通信技術

4.2.3 待避・追越駅

図6に示すモデル駅において、列車の発車を30分間遅延させた場合の実績走行軌跡について、信号の制約の範囲内で走行し、特に制御を行わなかった場合を図12 (a) に、予測制御を行った場合を図12 (b) に示す。また、同じ場合について、それぞれ駅近傍を拡大したものを図13に示す。

このモデル駅の場合、予測制御を実施しても、棒線駅の場合と同様にダイヤどおりに回復するタイミングは同じ列車という結果になっている。また、回復の過程においては、駅の着発時刻で評価すると、予測制御を行わない場合の方が早い列車も存在する。これは、以下の理由による。予測制御を行わない場合には、図12に示すように、本来、本線を通過する列車が、先行する停車列車が未出発のため出発進路手前で停車となるが、開通している場内進路内方に進入している。これによって、さらに後続の停車列車の場内進路開通タイミングが早くなっている。一方、予測制御を行った場合、この通過列車は制約となる出発進路の開通タイミングの予測時刻に基づいて、途中で停止しないような制御を行う。この結果として、後続列車に対する進路開通タイミングが、予測制御を行わない場合に比較して遅くなっている。これに対しては、例えば、後方の開通軌道回路数の情報などから後続列車との離隔を判断し、ある程度の範囲内に副本線に停車する列車が存在する場合にのみ、出発進路の開通予測時刻を算出しないことなどで回避することが可能と考える。ただし、上述の

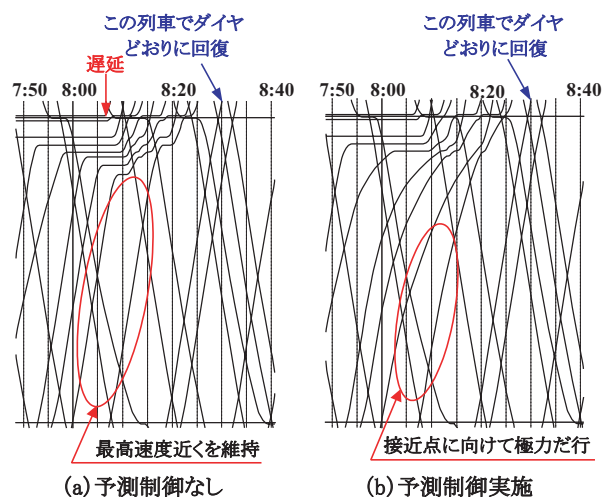


図12 待避・追越駅でのシミュレーション結果

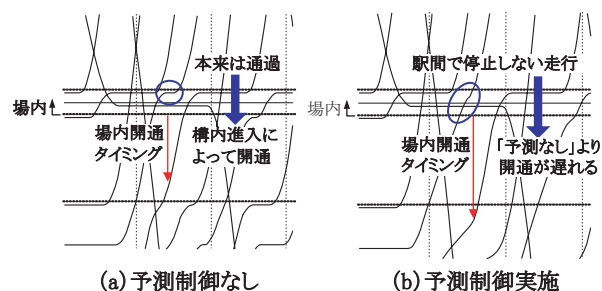


図13 待避・追越駅でのシミュレーション結果 (拡大)

ように自身は出発進路手前で一旦停止することとなる。

モデル駅を中心とするエリアをき電区間とする変電所において、遅延の影響が発生した時間帯を中心とする7:30から9:00の間の消費電力量を試算した結果を表9に示す。この区間においては、図12上部の遅延発生駅と、下部の駅のはぼ中間に、き電区分境界が存在するモデルを想定した。この場合、遅延が発生した駅を含む変電所①では予測制御を実施しても、ほとんど同じ値である。これに対して、もう1つの変電所②では予測制御実施時には約6%少なくなっている。これは、予測制御の実施により不要な加速をしない列車制御の効果と見られる。

表9 待避・追越駅での遅延発生時の変電所消費電力量

	消費電力量 (MWh)	
	変電所① (き電範囲： 図13の上部)	変電所② (き電範囲： 図13の下部)
予測制御実施	36,841 (100.1%)	34,665 (93.7%)
予測制御なし	36,790 (100%)	37,015 (100%)

5. まとめ

駅近傍における列車の走行状態を予測し、運行状況に応じて短時間運転を行う予測制御方式について、待避・追越設備のある駅や、通過列車が存在する場合を中心として、これらの条件に適応した制御方法を提案し、計算機シミュレーションによる導入効果の検証を行った。

予測制御を行うことで、これまでに検討した基礎的な条件下と同様に、列車遅延時に機外停車の機会が削減できるとともに、変電所の消費電力量を数%程度低減できる可能性を確認した。列車遅延からの回復については、折返し駅ではある程度の効果が得られるとの結果であった。一方、中間の駅において、今回の検討モデルの設定においては、最小運転時隔とダイヤ上の時隔の関係などから、大きな効果を得られない場合があることが分かった。したがって、適用に際しては実際の線区条件に応じて、事前に検証することが必要であると言える。

6. おわりに

予測制御を精度良く実現するためには、高度な運転制御が必要となる。今後、列車が運行管理や保安情報のみならず、沿線設備や災害情報なども得ることで、高度に自律的な運転制御を行うシステムの開発に着手する予定であり、本検討の成果を反映することも検討していきたいと考えている。

文献

1) 平栗, 富井, 長谷: 予測制御による列車制御方式, 鉄道総研報告, vo.17, No.6, pp.29-34, 2004