

信号設備条件を考慮した予測制御方式の評価

平栗 滋人* 喜多川 治雄*

Evaluation of Prediction Control Considering Conditions of Signalling System

Shigeto HIRAGURI Haruo KITAGAWA

We proposed a train control method named “prediction control”. The method aims to prevent undesirable deceleration or stop between stations in a high-density line, and controls train’s speed appropriately based on the prediction of the train movement and data communications. In order to evaluate the effect of the method by the recovery time from the train delay, we modelled the recovery mechanism. We performed evaluations for such conditions as the speed restriction, the length of track circuit installed at a station and the approach speed to the station. Our evaluation confirms that the prediction control method reduces the recovery time, and clarifies basic characteristics of the effects of this method.

キーワード：列車制御，予測制御，運転時隔，遅延回復，高密度運転

1. はじめに

都市部の通勤線を初めとして，列車密度が高い路線では乗客の混雑などによって，列車が計画された時間より長く駅に停車することがしばしば発生する。さらに，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。このような課題を解決するための1つの方法として，先に我々は，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走行を行う，予測制御と呼ぶ列車制御方式を提案した。さらに，計算機シミュレーションによって，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¹⁾。

上記の検討では，1箇所のモデル線区を想定し，信号設備の詳細な条件，勾配などの線路条件，あるいは車両性能などの要素を設定して，精度の高いシミュレーションにより効果を検証した。一方，実際には列車検知と進路制御の基本となる軌道回路の長さ，駅構内の速度制限の有無や側線の有無，あるいは路線末端の折返し駅の有無など様々な条件がある。これらが予測制御の導入効果，特に列車遅延の回復能力のレベルに影響することが想定される。しかし，これまでは各種の条件が予測制御の効果に及ぼす影響については検討を行っておらず，その有無や程度が明らかになっていない。そこで，本論文では信号設備などの条件が予測制御の導入効果に与える影響について，列車遅延の回復能力の観点から評価した結果を報告する。

2. 予測制御

2.1 列車制御の方法

予測制御においては，地上-車上間の情報伝送手段が存在すること，および列車は連続的な位置検知機能を持つことを基本的な前提としている。なお，本論文の検討においては，信号方式はいわゆる一段ブレーキによる列車制御を実現するデジタルATC²⁾と仮定した。

予測制御の基本的な概念は以下のとおりである。

- (1) 列車に対して，(時刻，位置，速度) からなる制御情報を与える。
- (2) 列車はこの制御情報が示す時刻に，同じく制御情報が示す地点(位置，速度)へ到達するよう，速度を制御する。

上記(1)の制御情報としては，次駅への到着に関する情報，および駅間での一旦停止を回避するための情報の2種類が存在し，状況に応じて適切な方を制御の目標とする。次駅への到着に関する情報において，時刻は列車ダイヤで定められた到着時刻，位置は所定の停止位置，速度はゼロとなる。なお，時刻情報は運行管理システムから列車運行状況に応じて指示される場合もある。駅間での一旦停止を回避するための情報においては，時刻は場内進路に対する停止パターンの解除予測時刻，位置と速度は停止パターン上に存在する接近点(2.2参照)の情報からなる。

例えば，先行列車との間隔が小さくなり，場内進路に対する停止パターンの制約を受けて停止すると判断される場合には，後者の情報が制御目標となり，パターン解除時間に接近点に到達するような走行制御を行う。これとは逆に，特に遅延などが発生していない場合には，前

* 信号通信技術研究部(列車制御)

特集：信号通信技術

者が制御目標となり、所定の時刻に駅に到着するような走行制御を行う。なお、走行制御については省エネルギーの観点から力行→だ行→ブレーキのパターンを基本とし、だ行する区間を極力長くとするような制御を行う。

2.2 基本となる制御論理

ここでは、予測制御の核となる駅手前での一旦停止を回避するための制御の考え方を述べる。

列車に遅延が発生した場合、一般的に運転時隔上のボトルネックとなる駅近傍では、先行列車との間隔が短くなり、後続の列車は場内進路に対する停止パターンによって減速、あるいは停止に至る場合がある。このとき、停止パターンが解除になる時刻があらかじめ分れば、速度を落して走行することで不要な減速や一旦停止を回避することができる。一方、さらに後続の列車に対する影響の波及を軽減するためには、できるだけ先行列車に接近し、短い時隔を確保することも必要である。これらを実現するために、列車は停止パターンが解除される時刻に、パターン上のいずれかの地点に到達するような制御を行うことが予測制御の基本的な考え方である。

このような制御の概念を図1、図2に示す。場内進路に対する停止パターンの解除予測時刻（先行する列車が駅構内から進出する時刻）は、先行列車の駅からの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。

予測制御の効果に関するシミュレーション結果の例を図3、図4に示す。

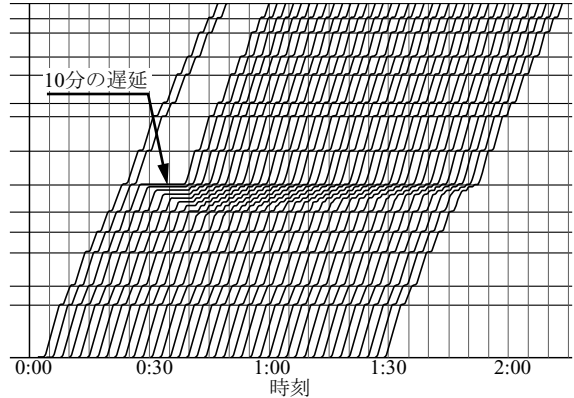


図3 走行軌跡（予測制御なし）

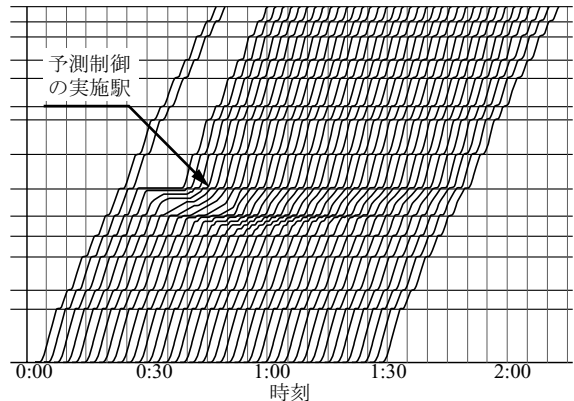


図4 走行軌跡（予測制御実施）

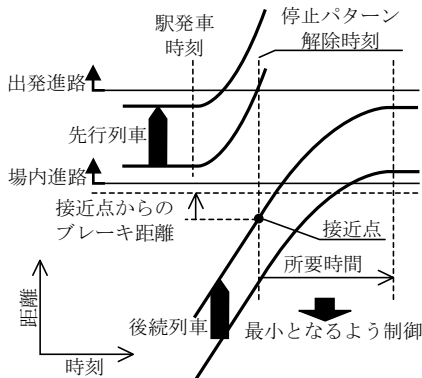


図1 予測制御の概念（時刻 - 位置）

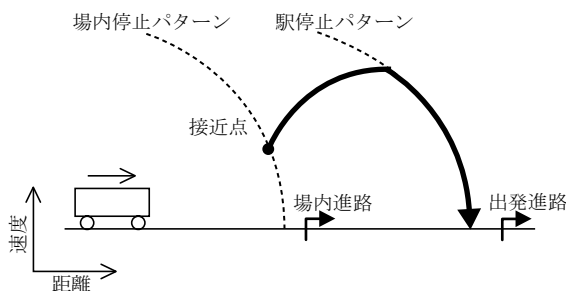


図2 予測制御の概念（位置 - 速度）

3. 効果の評価

3.1 評価の前提

予測制御の導入効果について、列車遅延の回復性能の観点から評価を行った。この際、運転時隔上のボトルネックとなる駅近傍での列車の挙動が、遅延の回復に対して支配的であるので、これに着目した。

条件を幾つかに変えた評価を簡易に行うために、列車の走行に関しては、加速度は2.5km/h/s、減速度は2.0km/h/sで一定とし、加速、ブレーキ時以外は一定速度で走行し、制限速度設定時にはそれから3km/h低い速度で走行

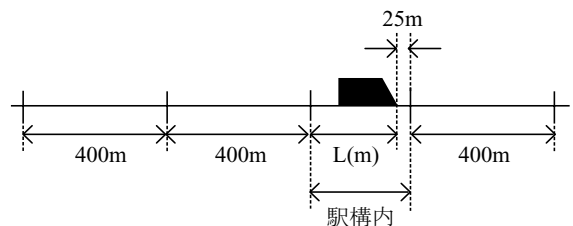


図5 検討のモデル（軌道回路長）

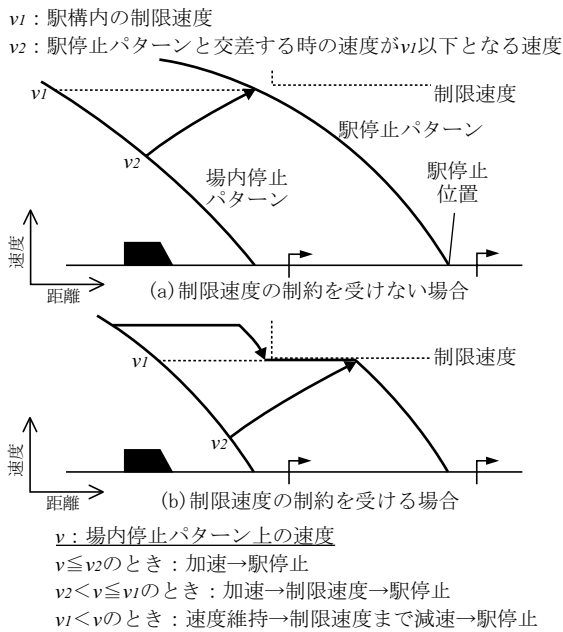


図6 駅進入時の走行パターン

する前提とした。その他、列車長は200m、駅間の軌道回路境界位置に対する停止パターンの起点位置(余裕距離)は50m(駅の停止位置は25m)、軌道回路の進出検知時素は2.0sと設定した。軌道回路長は図5に示すように駅間は400mとし、駅構内では列車停止時の先頭から場内進路の位置までの距離をL(m)として評価に際して、幾つかの値を設定することとした。

場内進路に対する停止パターンが解除された後の走行パターンについては、これまでの検討では単に加速→駅停止のための減速としていたが、駅構内の速度制限の存在を考慮して図6に示すように分類し、本論文の検討ではこれに拠った。

これら条件の下で、場内停止パターンが解除されたとき、パターン上のある地点に列車が存在したと仮定した場合の駅到着までの所要時間を図7に示す。この値は、2.2で述べた予測制御の接近点を決定するための基本となるものである。駅構内の制限速度に対応した所要時間の曲線ごとに最小値をとる速度が存在し、これが予測制御の接近点の速度となる。また、横軸の速度ゼロに対する値は、場内進路手前で一旦停止した状態から駅に到着した場合の所要時間である。つまり、この値と最小の所要時間の差が、予測制御を行った場合に短縮される場内停止パターン解除から駅到着までの所要時間である。

駅構内の制限速度が低い場合には、低速で走行しなければならない区間の距離が長いので、全体的に所要時間は長くなる。また、制限速度が65km/hの場合と70km/hの場合で殆ど差が無いのは、本節の条件下では制限速度が65km/h以上になると駅構内ではその制約を受けなくなるためである。

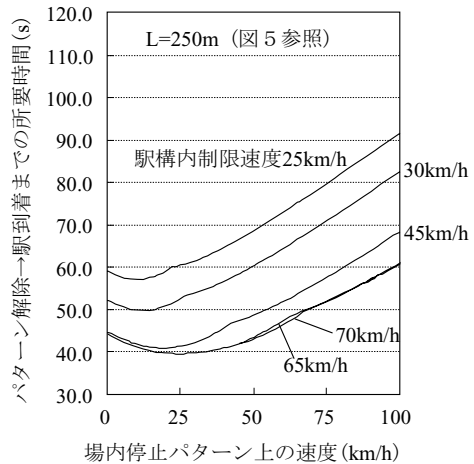


図7 パターン解除からの駅への所要時間

3.2 遅延回復評価の方法

図7の結果から、予測制御の接近点を決定し、場内進路手前で一旦停止してから駅に進入する場合に対する所要時間短縮の程度を得ることができる。これが、列車遅延の回復に具体的にどのような効果を及ぼすかを評価した。以下に評価の方法を述べる。

図3、図4の例のように列車遅延が発生し、通常より短い間隔で多数の列車が存在している状況を前提とすると、列車の走行は、①場内進路開通から駅に到着するまで、②駅停車中、③駅発車から構内を進出し後続の列車に対して場内進路が開通するまで、の3つに分けることができる。この内、①は図7に示した結果から得ることができる。②は30sと設定した。また、③については車両性能や設備条件から、あらかじめ求めることができ、先述の条件下では27.5sとなる。これらの関係の一例を図8に示す。この例では、図5のLは250mとした他、駅構内の速度制限はなし、駅間での列車の最高速度は100km/hとした。このとき、列車は①から③を合計した

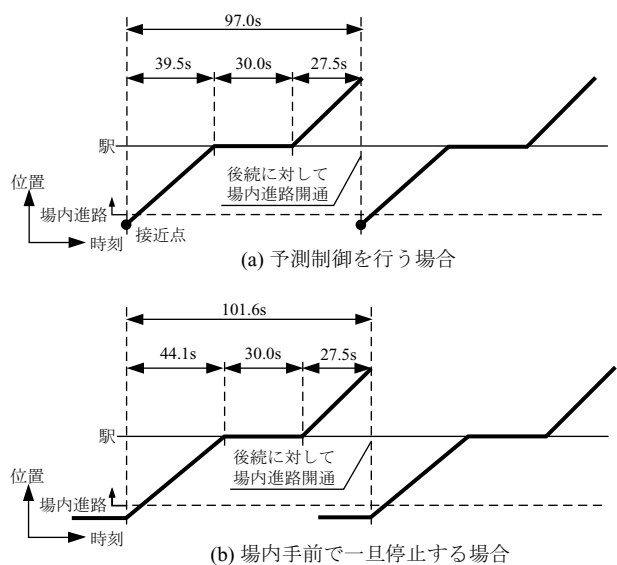


図8 列車接近時の時隔

特集：信号通信技術

時隔で駅に到着し、発車する。一般には、この時隔が通常時のダイヤ上の時隔よりも短いため、遅延が次第に回復することとなる。なお、通常より短い時隔で駅に到着した場合、出発進路側の設備条件から決る時隔を確保できているかが、問題となる場合がある。今回の検討条件では出発側の時隔は約44sであり、予測制御などによって短い時隔(図8参照:97s程度)の運転をしても影響のないことを確認している。

一方、ダイヤ上の時隔については、設定した条件の下での駅近傍の最小運転時隔を算出し、これに5sの余裕を加えて整数化した値とした。図8の条件下では最小運転時隔は117.2sとなり、ダイヤ上の時隔は123.0sとなる。

駅においてある列車が遅延した場合、直後の列車はダイヤで計画された時刻から遅れて駅に到着する。このときのダイヤ上の到着時刻からの遅れを T_d とする。先に述べたように、予測制御を行った場合、あるいは場内手前で一旦停止する場合のいずれにおいても、通常よりは低い速度で駅に接近するためダイヤ上の時隔より短い時隔で駅に到着することが可能である。このときの時隔を T_p とする。ダイヤ上の時隔を T とすると、遅延の原因になった列車の N 本後の列車におけるダイヤからの遅延時間 TD_N は

$$TD_N = T_d - (N-1) \times \Delta t \dots (1)$$

$$t = T - T_p$$

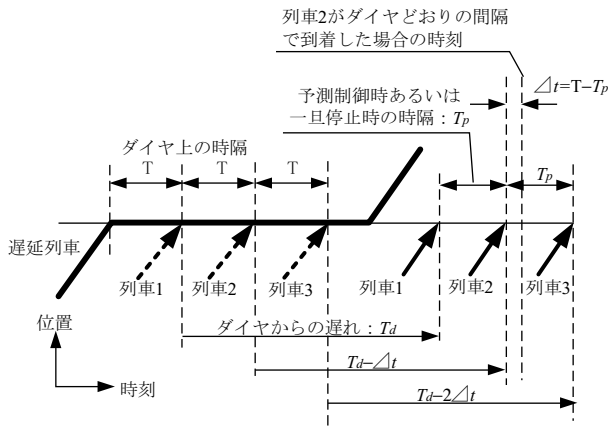


図9 列車遅延の回復量モデル

と表現される。

遅延の回復を列車がダイヤで定められた時刻どおりに駅で到着、発車できるようになったことと定義すると、これは式(1)の値がゼロになることと等価である。このときの N の値 N_r が遅延回復までに要する列車本数となる。他、遅延回復に要する時間は $(N_r-1) \times T_p$ と表現される。これらの概念を図9に示す。

表1に遅延からの回復時間の算出結果例を示す。最初の列車が10分遅延した場合、予測制御を行った場合の回復時間は予測制御を行わない場合に比較して79%であり、580秒程度早期の回復が期待できる結果となっている。

表1 列車遅延の回復能力

	回復時の時隔 T_p (s)	1列車当りの回復時間 Δt (s)	回復に要する列車本数	回復時間 (s)
予測制御なし (一旦停止)	101.6	21.4	28.0	2747.0
予測制御実施	97.0	26.0	23.3	2158.6

ダイヤ上の時隔：123s, 初期遅延時間：600s

3.3 評価の結果

本節では場内進路の位置(図5のL)、駅到着時の列車の進入速度を変化させたときの予測制御の導入効果について、3.2で述べた方法で評価した結果を述べる。

場内進路位置に対する評価結果を表2および図10に示す。場内進路が駅停止位置より遠い(Lが大)ほど、場内停止パターン解除からの走行距離が長くなるため、回

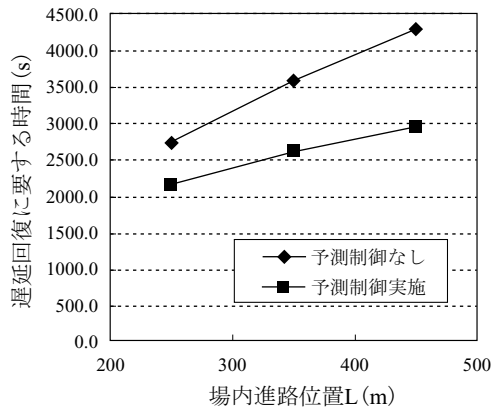


図10 場内進路位置に対する遅延回復時間

表2 場内進路位置に対する遅延回復能力

場内進路位置 L (m)		最小運転時隔 (s)	ダイヤ時隔 T (s)	遅延原因列車直後の列車の遅延 (s)	回復時の時隔 T_p (s)	1列車当りの回復時間 Δt (s)	回復時間 (s)	回復時間の差 (予測なし-予測制御)	回復時間の比 (予測制御/予測なし)
250	予測制御なし	117.2	123.0	578.6	101.6	21.4	2747.0	588.4	0.79
	予測制御				97.0	26.0	2158.6		
350	予測制御なし	120.9	126.0	582.4	108.4	17.6	3587.1	965.0	0.73
	予測制御				103.1	22.9	2622.1		
450	予測制御なし	124.6	130.0	584.4	114.4	15.6	4285.6	1336.4	0.69
	予測制御				108.5	21.5	2949.2		

駅間での最高速度：100km/h, 駅構内の速度制限なし, 原因列車の遅延時間：600s

表3 駅進入速度に対する遅延回復能力

駅進入速度 (km/h)		最小運転 時隔 (s)	ダイヤ 時隔 T (s)	遅延原因列車 直後の列車の 遅延 (s)	回復時 の時隔 T_p (s)	1列車当りの 回復時間 Δt (s)	回復時間 (s)	回復時間の差 (予測なし- 予測制御)	回復時間の比 (予測制御/ 予測なし)
45	予測制御なし	104.3	110.0	592.1	102.1	7.9	7652.3	2629.7	0.66
	予測制御				98.4	11.6	5022.6		
80	予測制御なし	110.1	116.0	585.6	101.6	14.4	4131.7	1142.1	0.72
	予測制御				97.0	19.0	2989.6		
100	予測制御なし	117.2	123.0	578.6	101.6	21.4	2747.0	588.4	0.79
	予測制御				97.0	26.0	2158.6		
120	予測制御なし	125.3	131.0	570.6	101.6	29.4	1971.9	344.0	0.83
	予測制御				97.0	34.0	1627.9		

場内進路の位置：L = 250m, 駅構内の速度制限なし, 原因列車の遅延時間：600s

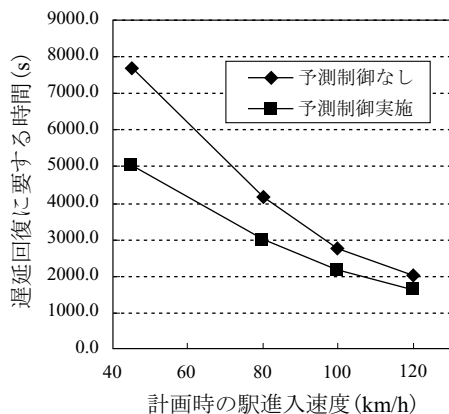


図11 駅進入速度に対する遅延回復時間

復能力も劣っている。また、予測制御を行った場合の行わない場合に対する回復時間の短縮効果は、比率にして約0.7~0.8、時間にして約590s~1300s程度が見込まれる。

表3と図11には、計画時の駅進入速度を変化させた場合の遅延回復時間を示す。なお、ここで言う駅進入速度は、計画ダイヤ作成の前提となる運転曲線自体において設定される速度のことを指す。進入速度をある程度落とした方が、最小運転時隔が小さくなるため、これを前提とした短時隔のダイヤを設定することができる。一方、予測制御においても、駅手前での速度を落とす制御を行うが、これは列車間隔が通常より短くなった状況に対応して動的に行うものであり、意味が異なる。

このケースでは進入速度が低く、最小運転時隔が短い場合に遅延回復時間が長くなっている。これは、進入速度に対して回復時の時隔 T_p の値は殆ど変わらないが、進入速度が低い場合にはダイヤ時隔が短く、両者の差である Δt の値が小さくなるためである。なお、ダイヤ時隔が同じであれば、駅進入速度の低い方が回復時間は短くなる。一方、表2および図10のケースでは最小運転時隔が短くなった場合、回復時の時隔がそれ以上に短くなるため Δt の値が大きくなり、回復時間が短くなっている。

予測制御を行った場合の行わない場合に対する回復時間短縮の効果の比率は0.66~0.83であり、進入速度が高いほどこの比は大きくなる傾向にある。ただし、時間で

みると120km/hの場合でも10分の遅延に対して、予測制御による回復時間短縮の効果は344sと6分近い。

4. 折返し駅での評価

4.1 折返し駅における制御

列車の折返しを行う駅において予測制御を行う場合も、駅に向かう列車に対して場内進路の開通予測時刻の情報を与えるという、制御の基本は同じである。折返し駅の配線および運転形態は複雑なものもあり様々であるが、本論文では図12、図13に示すような簡単なモデルを検討対象とする。

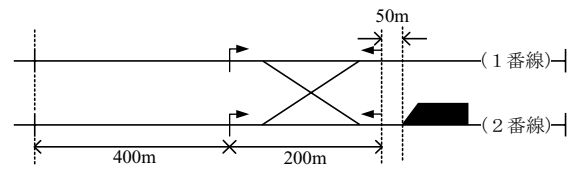


図12 折返し駅の検討モデル

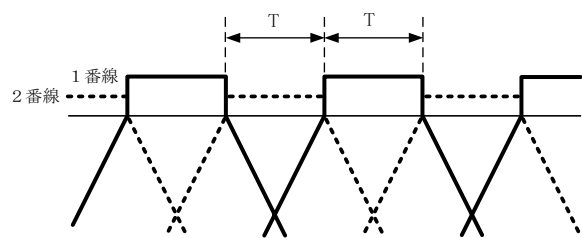


図13 折返し駅の運転形態モデル

折返し駅で予測制御を行う場合の、場内進路開通時刻予測のパターンの例を図14に示す。3章までの例とは異なり、場内の進路には複数があるため、分岐の速度制限の有無によって各々の走行パターンがある。つまり、予測制御のための接近点も各進路に応じて存在することになり、列車は自身が進入する進路に応じて適切な接近点を選択する。

検討の条件としては、分岐部の分岐側の速度制限は45km/h, 70km/hの2種類を設定した。また、分岐を含む区間での列車進出検知、ポイント転換、進路構成に要する時間は10sとした。

特集：信号通信技術

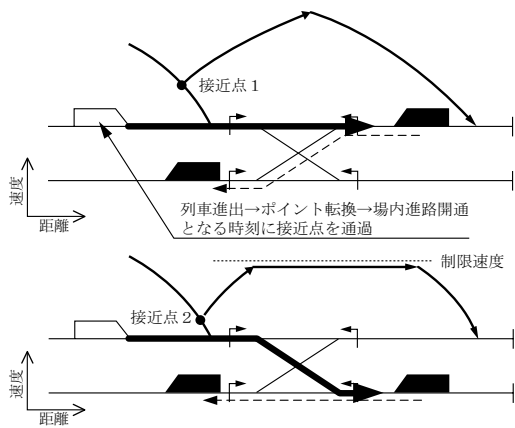


図14 折返し駅での予測制御

4.2 評価の条件

基本的な考え方は3.2で述べたものと同様である。4.1で示したモデルを前提として駅近傍での最小運転時隔を算出し、検討用ダイヤを設定した。分岐部の制限速度が45km/hの場合には、図13のTを136sと設定した。

遅延発生時の回復評価の考え方を図15に示す。実際の配線イメージとは異なるが、3.2での評価の考え方を踏襲した表現としている。なお、ここに示すのは分岐部の制限速度45km/h、遅延発生時に予測制御を実施した場合について、場内進路開通から駅到着までの所要時間、駅出発から他列車に対して進路が開通するまでの所要時間などを算出した結果の例である。なお、駅での停車時間については回復途上では3.2の場合と異なり、簡単のため、図15のようなタイミングで列車を発着させる設定としたため、どの列車についても同一の値とはなっていない。

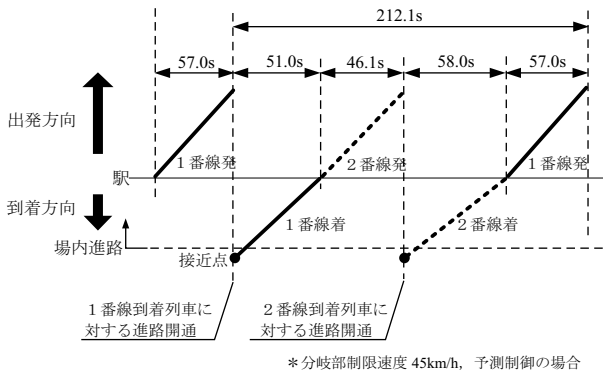


図15 折返し駅での列車接近時の時隔

4.3 評価の結果

分岐部の分岐側制限速度が45km/h、70km/hの各場合について遅延回復時間を算出した結果を表4、図16に示す。3章と同様に予測制御を行った場合の方の遅延回復時間が、行わない場合の0.7~0.8となっている。また、このケースでは最小運転時隔が短い方が回復時の時隔も短い、前者の減少分に対して後者の減少分が小さいため、その結果として遅延回復時間が大きくなっている。

表4 折返し駅での遅延回復能力

予測制御	ダイヤ時隔 T (s)	遅延原因列車直後の列車の遅延 (s)	1列車当りの回復時間 Δt (s)	回復時間 (s)	回復時間の差
なし	136.0	577.9	25.1	2553.4	507.1
あり			30.0	2046.3	

分岐側制限速度：45km/h、原因列車の遅延時間：600s

予測制御	ダイヤ時隔 T (s)	遅延原因列車直後の列車の遅延 (s)	1列車当りの回復時間 Δt (s)	回復時間 (s)	回復時間の差
なし	121.0	583.5	17.3	3509.5	1036.5
あり			23.1	2472.9	

分岐側制限速度：70km/h、原因列車の遅延時間：600s

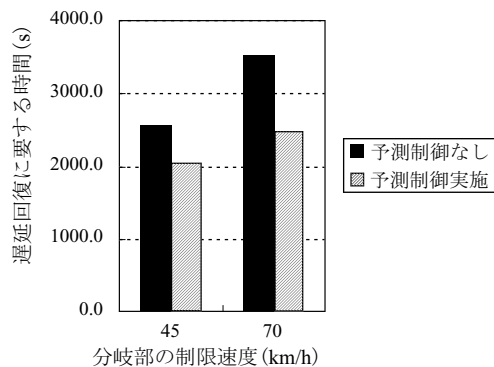


図16 折返し駅での列車接近時の時隔

ただし、3.3の場合と同様にダイヤ時隔が同じであれば、最小運転時隔が短い方の回復時間が短い。

5. おわりに

予測制御の導入効果について基本的なモデルを前提として遅延回復力の観点から評価を行った。個別でのケースの効果については、文献1)のような詳細なシミュレーションなどによる検討、確認が必要であるが、本論文での検討によって、予測制御による早期遅延回復に見込まれる効果と、進路の位置や列車速度、制限速度などの条件の導入効果への影響について基本的な特性を明らかにした。

現在、路線中間の交互発着駅や、待避・追越駅での制御論理や検証の他、実現する場合のシステム構成などについて検討を進めており、本論文での検討結果を踏まえて詳細化を図る予定である。

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, Vol.17, No.6, pp.29-34, 2004
- 2) 高重, 渡辺: 高速高密度区間用デジタルATCの開発, 鉄道総研報告, Vol.9, No.1, pp.49-54, 1995