

複数の観点による運転方法の比較評価方法の構築

熊澤 一将* 武内 陽子*

Construction of a Comparative Evaluation Method of the Driving Operation from Multiple Viewpoints

Kazumasa KUMAZAWA Yoko TAKEUCHI

In determining a train schedule, the running time between stations and minimum headway are important items. On the other hand, it is necessary to evaluate the driving operation from not only the viewpoint of headway but also other viewpoints such as energy consumption and train delay. Therefore, in this research, we propose driving operation that enables us to shorten minimum headway in the automatic block section. Furthermore, based on a train performance calculation system and a train operation simulator, we construct a method by which we can comprehensively compare and evaluate driving methods from the viewpoint of the running time, consumption energy, minimum headway, and train delay.

キーワード：運転曲線，運転時隔，列車運行，消費電力，シミュレーション

1. はじめに

列車ダイヤを決定する上で、駅間の運転時分と運転時隔は重要な基礎データとなる。一方、列車の運転方法は、運転時隔のみならず、消費エネルギー量や列車遅延など複数の観点で評価する必要がある。そこで、本研究では、自動閉そく区間において運転時隔を短縮可能な運転方法を提案するとともに、運転曲線作成システム¹⁾と列車運行シミュレータ²⁾をもとに、運転時分や運転時隔、消費エネルギー量、および、列車遅延の観点から運転方法を複合的に比較評価可能な方法を構築した。

実路線データを対象として、提案した運転方法を含めた複数の運転方法を、構築した評価方法を用いて比較することで、各運転方法の特徴を複数の観点から定量的に評価した結果を報告する。

2. 運転時隔を短縮可能とする運転方法

2.1 運転時隔

列車ダイヤ上で列車間に設定される時間間隔を「運転時隔」という。列車ダイヤ作成においては、最小となる運転時隔を知る必要がある。自動閉そく区間の場合、運転曲線や停車時分などから信号機ごとに最小となる運転時隔を算出し、その中で最大となるものを「最小運転時隔」と呼ぶ。最小運転時隔は小さいほど単位時間あたりの列車本数を多く設定できるため、運転時分とともに列車ダイヤ作成に大きな影響を与える。

最小運転時隔は連続して走行する2列車の関係によっ

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

て、続行時隔、追込時隔、開通時隔（後追込時隔）、交差支障時隔に大きく分類される。本研究では、列車ダイヤへの影響が大きい続行時隔に焦点をあてて検証するため、以降、続行時隔を運転時隔と呼ぶこととする。

2.2 運転時隔の算出

図1に運転時隔の算出パラメータを示す。運転時隔算出対象となる信号機Aを先行列車が通過し、信号機Aに所定の信号現示（ここでは進行現示）を再び現示するために必要な位置である信号機Cを通過しきるまでの時間を t_1 とする。また、続行列車が進行以外の現示を見て減速することがない最小距離にある地点を接近可能点と呼び、この地点から信号機Aを通過するまでの時間を t_2 とする。

一般に運転時隔は、図2の時隔曲線を用いて算出される。時隔曲線は横軸に時間、縦軸に距離をとり、運転曲線（時間曲線）から得られる列車の動きをもとに作成する。時隔曲線では列車長と停車時分も考慮し、運転曲線や信号機位置、信号現示図によって、運転時隔が最も大きくなる信号機を明示できる。図1のケースでは、 t_1 と t_2 、さらに図2に示す t_3 と t_4 の和が信号機Aにおける運転時隔となる。

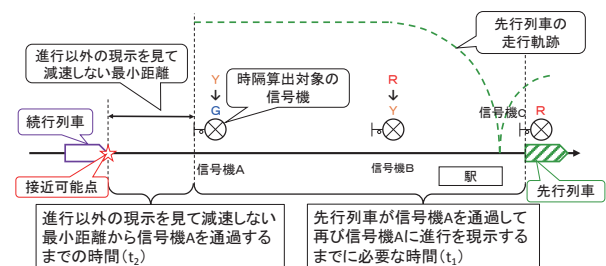


図1 運転時隔の算出パラメータ

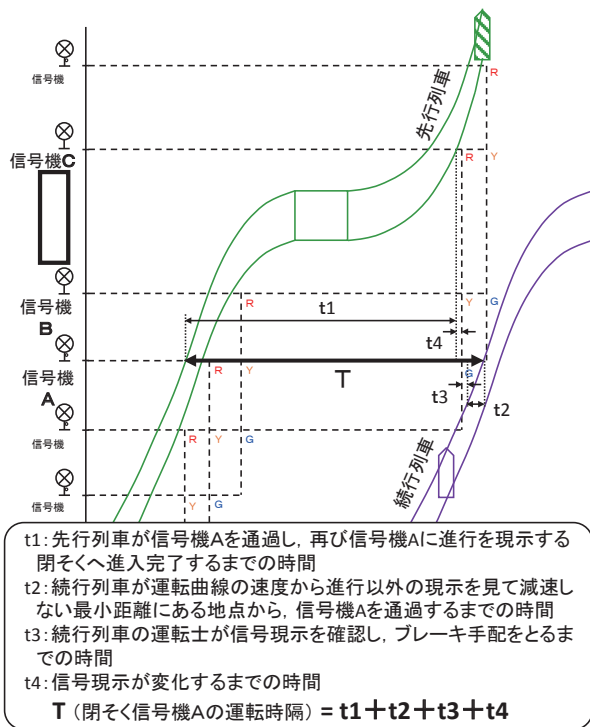


図2 時隔曲線

2.3 接近可能点速度を低下させる運転方法

先行研究³⁾において運転時隔を短縮可能な運転方法の算出方法として、接近可能点における速度（接近可能点速度）を徐々に低下させる方法を提案した。この方法では、接近可能点まで惰行運転を行い、接近可能点を通過後は、通常の運転に戻るものとする。図1の説明で述べたように、接近可能点とは、運転時隔の制約となる信号機において、制約となる現示を見て減速することのない最小距離だけ離れた地点である。従って、接近可能点の位置は、制約となる信号機の位置と信号現示からブレーキ曲線を逆引きすることで算出できる。図3にこの算出方法を示す。

接近可能点速度が与えられた場合の接近可能点の位置は、式(1)を用いて算出する。図3では、算出した接近可能点を☆で示している。

$$P_{close} = P_{sig} - \frac{V_{close}^2 - V_{sig}^2}{7.2 \times \beta} - \frac{V_{sig}}{3.6} \times 1.5 \quad (1)$$

- P_{close} [m]: 接近可能点の位置
 - P_{sig} [m]: 制約となる信号機の位置
 - V_{close} [km/h]: 接近可能点速度
 - V_{sig} [km/h]: 制約となる信号現示指示速度
 - β [km/h/s]: 途中ブレーキ減速度
- ※ただし、 $V_{close} > V_{sig}$ とする。

式(1)を用いて、最速となる運転曲線上にある接近可能

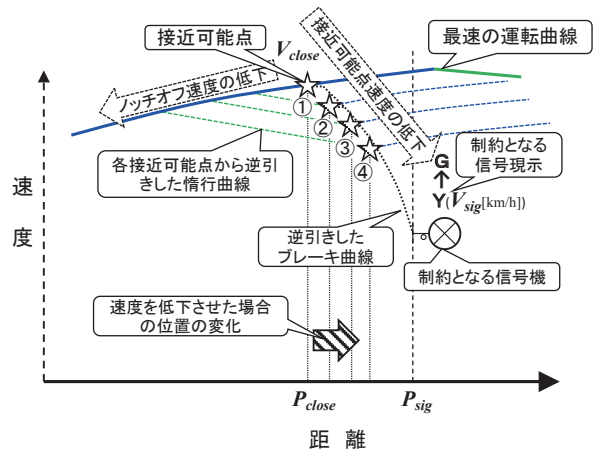


図3 接近可能点の算出方法

点①から、接近可能点速度を徐々に低下させた場合の接近可能点の位置②から④を算出する。接近可能点速度を低下させるには、ノッチオフ速度も低下させる必要がある。求めた接近可能点と接近可能点速度から惰行曲線の逆引きを用い、最速の運転曲線と交差する点（惰行開始点）の速度が、ノッチオフ速度となる。図3で、緑色の点線と青い曲線の交点が示す速度である。

2.4 運転時隔を短縮可能とする運転方法

先行研究³⁾では実際の路線データを用いて、提案した運転方法の適用による運転時隔の変動を確認した。その際の運転時隔の算出条件を、以下に示す。

<運転時隔の算出条件>

- (1) 検討対象は列車長 160m の通勤型車両
- (2) 各駅の停車時分は 20 秒
- (3) 停車列車の続行時隔のみを検討対象とし、先行列車と続行列車は同様の運転方法を適用
- (4) 信号現示変化時分は 1 秒、運転士が制動手配をとるまで時分を 1.5 秒とし、注意現示 (Y) の制限速度は 45 km/h、減速現示 (YG) の制限速度は 65 km/h
- (5) 続行列車の接近可能点は、進行現示 (G) になる直前の下位現示 (YG または Y) から減速曲線を作成することで算出
- (6) 運転曲線作成時に途中ブレーキ減速度として適用する減速度は 2.0 km/h/s

この検証では接近可能点速度を低下させることで、対象駅間の運転時分は増加するが、運転時隔は減少する結果を得た（図4）。この結果をもとに、駅間走行時分が与えられた場合、運転曲線作成システム¹⁾を用いて、接近可能点速度を低下させることで運転時隔を短縮可能な運転方法を算出する方法を開発した。主な手順を下記(1)～(4)に、算出のフローを図5に示す。

- (1) 最速となる運転方法の算出：運転曲線作成システムを用いて、線路条件や車両条件、走行条件を基に最

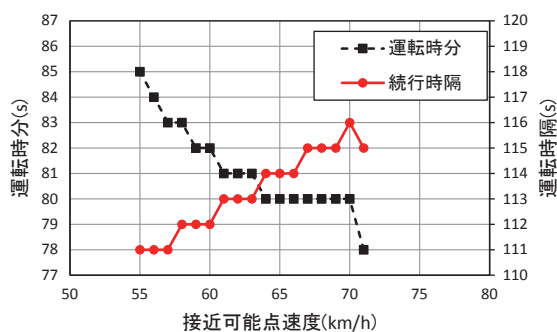


図4 接近可能点における速度の低下による影響³⁾

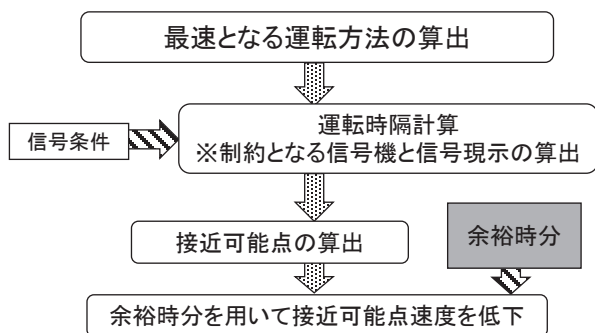


図5 運転時隔を短縮可能な運転方法の算出

速となる運転方法を算出する。

- (2) 運転時隔計算：上記(1)で算出した運転曲線と信号現示系統などの信号条件をもとに、運転時隔を算出する。運転時隔を算出する過程で、制約となる信号機と信号現示を抽出する。
- (3) 接近可能点の算出：前節で示した手法を用いて、接近可能点を算出する。
- (4) 余裕時分を用いた接近可能点速度の低下：最速となる運転方法を用いた場合の走行時分と与えられた駅間走行時分に差分（余裕時分）を用いて、接近可能点速度を低下させる。

3. 複数の観点による運転方法の比較評価

運転時隔の短縮を目的とした運転方法を提案してきたが、運転方法は運転時隔のみならず、消費エネルギー量や列車遅延など複数の観点で評価する必要がある。ここでは、複数の観点による運転方法の比較評価方法を構築するとともに、他の運転方法と運転時隔を短縮可能な運転方法を比較評価する。

3.1 比較評価する運転方法

本研究では図6に示す実際の路線データに対して、特徴の異なる3とおりの運転方法を比較する。それぞれの運転方法を算出する際に必要となる条件は、2.4節に記載した条件と同様である。各運転方法とその特徴を以下

に示す。

- (1) 運転時分優先：運転曲線作成システムを用いて作成した最速の運転方法である。
- (2) 運転時隔優先：運転時隔を短縮可能な運転方法である。2.4節で提案した算出方法より作成する。制約となる信号機は図6では信号機2であり、制約となる信号現示はYである。
- (3) 省エネ優先：先行研究において開発した省エネ運転支援システム⁴⁾を用いて算出した運転方法である。本研究ではブレーキノッチの探索は実施せず、惰行点の調整を適用した。

なお、運転時隔優先と省エネ優先の運転方法を算出する際、走行時分の指定が必要となる。そこで、運転時分優先における走行時分を5秒単位で切上げ、さらに運行上の余裕として5秒を付加した100秒を指定時分とした。3つの運転方法を図6に示す対象路線のAB駅間に適用した。図7には、結果として得られた運転曲線のイメージ図を示す。

3.2 運転方法を評価する複数の観点

消費エネルギー量および列車遅延の観点に加え、運転操縦の煩雑さや乗り心地の観点による評価も望まれることから、次の4つの項目で運転方法を評価する。それぞれの特徴を以下に示す。

- (1) 運転時分：運転時分の増加は遅延に影響する。この値は小さい方が望ましい。
- (2) 運転時隔：2.1節に記載したとおり、運転時隔は小さい方が望ましい。運転時隔の算出条件は、2.4節に示すとおりである。
- (3) 消費エネルギー量：環境の観点から、列車運行の消費エネルギー量を低減することが望ましい。本研究では、運転曲線を用いた電車で消費エネルギー計算

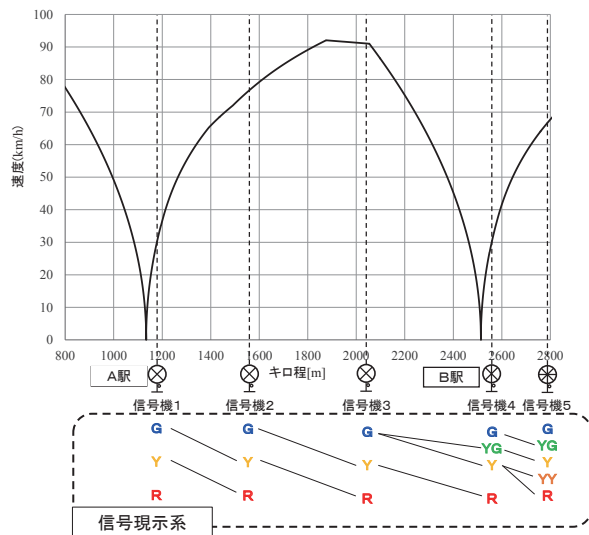


図6 対象路線の条件

特集：輸送・交通計画技術

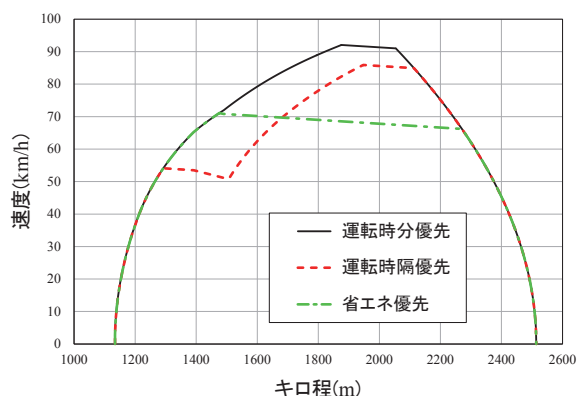


図7 比較する運転方法

システム⁵⁾を用いて評価値を算出する。なお、回生ブレーキによる効果は考慮しない。

- (4) ノッチ切換え回数：運転操縦の煩雑さ、乗り心地の悪化を評価する項目として、「力行ノッチから惰行」「惰行からブレーキノッチ」といったノッチを切り換える箇所数の増加が挙げられる。ノッチ切換え回数は少ない方が望ましい。

3.3 レーダーチャートによる比較評価方法

3.1節で述べた各運転方法を、3.2節で示した各項目で評価する。どの観点重要視するかは、路線特性などに依存することから、レーダーチャートを用いて4つの評価項目を同時に示す方法を提案する。運転時分優先を用いた場合の値を基準とし、レーダーチャートの内側へ向かうほど各評価項目が望ましいことを示す。

図7に示した各運転方法の比較結果を図8に示す。運転時隔優先では、運転時隔は最小だがノッチ切換え回数は最大で、消費エネルギー量は省エネ優先よりも大きくなっている。一方、省エネ優先を適用した場合、消費エネルギー量は最小だが、運転時隔は運転時分優先よりも

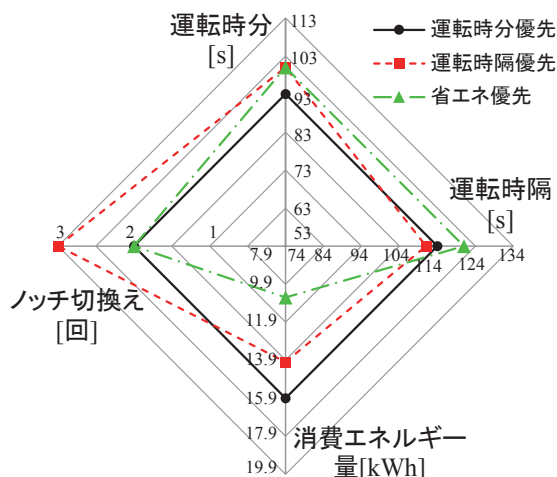


図8 複数の観点による運転方法の比較

大きくなってしまふことがわかる。本研究で適用した比較を実施することで、他の項目へ影響度合いも含め、対象とする路線において有利な運転方法を定量的に検討することができる。

4. 列車遅延による運転方法の比較

前節までは、1列車の1駅間に着目した比較評価を実施してきたが、本節では、3.1節の3とおりの運転方法の違いが列車ダイヤ全体に与える影響を、列車遅延で評価する。そこで、列車遅延を推定可能な列車運行・旅客行動シミュレータ²⁾を改良し、3.1節の各運転方法を再現可能とした。以後、4.1節は列車運行・旅客行動シミュレータの概要、4.2節は運転方法の再現、4.3節は計算条件、4.4節は比較評価結果について述べる。

4.1 列車運行・旅客行動シミュレータの概要

列車ダイヤを遅延の観点から評価するためには、その列車ダイヤを実施した場合の各列車の遅延量を推定することが必要である。そこで、数十駅、数十万人程度の

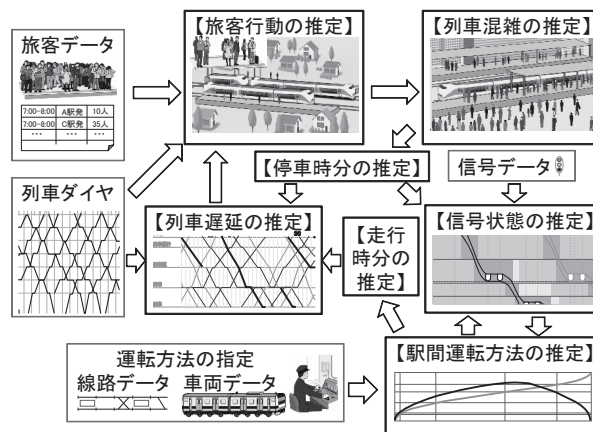


図9 シミュレータの計算フロー²⁾

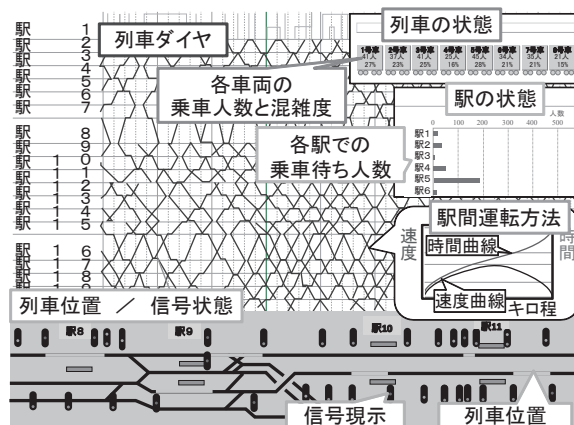


図10 シミュレータの計算結果例²⁾

旅客数を想定した実規模の路線を対象として、列車運行だけでなく、旅客行動を模擬可能な「列車運行・旅客行動シミュレータ」を評価計算に用いることとする²⁾。このシミュレータの計算フローを図9に、計算結果例を図10に示す。自動改札機で取得される旅客データ(乗車駅、降車駅、利用時間帯)、列車ダイヤデータ、信号現示の遷移等を入力とし、旅客行動履歴、各列車の各駅での運転曲線、各列車の各駅での着発時刻などを出力する。なお、駅間運転方法の計算には、運転曲線作成システムのノウハウを活用する。

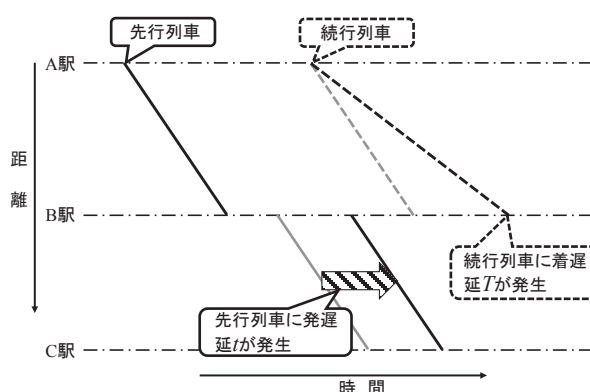


図11 遅延発生時の運転方法の比較

4.2 列車運行・旅客行動シミュレータによる 運転方法の再現

運転曲線作成システムには、ある位置において力行・惰行・ブレーキの運転操作とノッチを指定可能な機能がある(以後「マニュアル運転指定」と呼ぶ)。マニュアル運転指定により、速度制限を守り、かつ、システム使用者が意図した運転曲線を作成できる。この機能を、列車運行・旅客行動シミュレータに移植することで、列車ダイヤ全体にわたって3章で述べた評価項目を計算可能とした。

本研究では、運転士が駅を出発する時点で運転方法を決定することを前提とする。また、駅間走行中に、運転士が信号現示による制限を確認した場合、その時点以降は、決定した運転方法ではなく、回復運転のための最速運転を実施するものとする。つまり、先行列車に遅延が発生し、下位の信号現示による速度制限が設定された場合には、マニュアル運転指定を解除し、最速の運転方法に切替えることとした。

4.3 計算条件

図6に示した路線条件に対して、運転方法の違いが列車ダイヤに与える影響を、列車遅延で評価する。3.1節、および、図7に示した各運転方法を、前節で述べたマニュアル運転指定を用い、列車運行・旅客行動シミュレータで再現する。計算条件として、列車本数は2本だけであるが、この計算により、先行列車の遅延による信号現示の変化が続行列車の運転方法に与える影響も考慮し、終日にわたる評価も可能であることを確認することができる。

A駅とB駅間の列車ダイヤ上の走行時分は100秒であり、B駅の所定停車時分は30秒である。先行列車のB駅発時刻がt秒遅延した場合を想定し、続行列車のB駅着遅延T秒を推定する(図11)。先行列車のB駅～C駅間は、運転時分優先を用いて遅延回復する。

4.4 運転方法の比較評価結果

先行列車に生じるB駅の発遅延時分tを90秒から1秒ずつ増加させ、続行列車に発生するB駅着遅延T秒を確認した。結果を図12に示す。

A駅とB駅間の運転時隔には設備上の余裕があるため、先行列車のB駅発遅延が95秒になるまで続行列車のB駅着遅延は発生しない。先行列車のB駅発遅延が95秒を超えると、運転時分優先、および、省エネ優先では下位現示による減速が発生する。4.2節で述べたように、下位の信号現示による速度制限が設定された場合は、マニュアル運転指定を解除し、最速の運転方法へと切替えることから、結果として、省エネ優先は運転時分優先と同じ運転方法になる。

先行列車の遅延が95秒を超えると、続行列車の着遅延が生じている。先行列車の遅延が96秒から102秒までの間は、運転時分優先より運転時隔優先の方が続行列車の着遅延が1秒から3秒小さくなった。

この原因を確認するため、運転時分優先と運転時隔優先で最も差が大きかった先行列車の遅延が100秒となる条件に関して、2列車間の時隔曲線(図13)と続行列車の運転方法を比較した(図14)。図13では運転時分優先を適用した場合、キロ程1500m付近で、運転時隔優先に比べて走行時分が増加する。図14をみると、運転

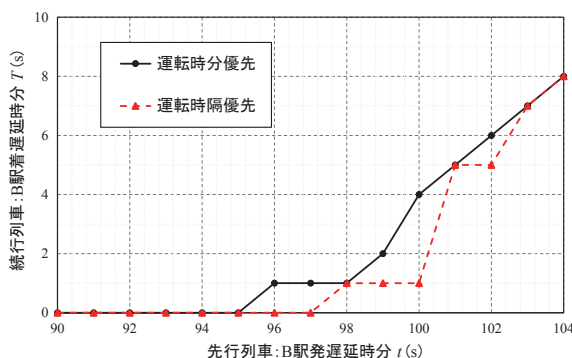


図12 先行列車と続行列車の遅延の関係

特集：輸送・交通計画技術

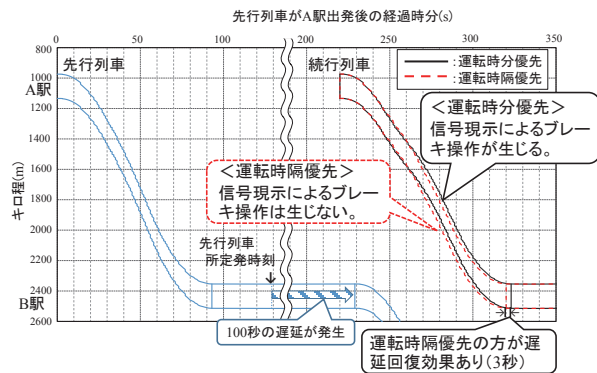


図 13 時隔曲線による比較（先行列車 100 秒遅延）

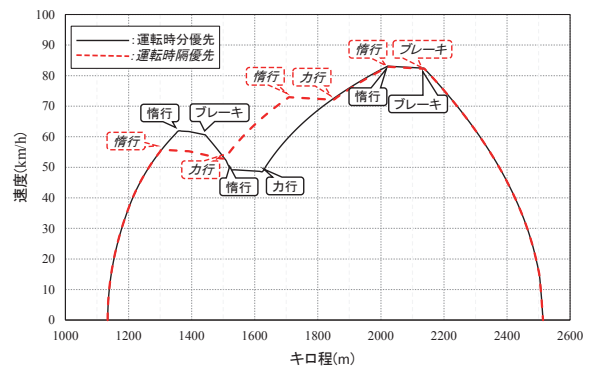


図 14 運転方法の比較（先行列車 100 秒遅延）

時分優先ではこの地点に存在する信号機 2（図 6）に対してブレーキが生じていることがわかる。一方、運転時隔優先では信号機 2 を惰行にて通過することで、下位現示によるブレーキが生じていないことを確認できる。以上より、本事例では、運転時隔優先を適用することで、続行列車が下位現示による減速を低減でき、列車遅延の低減に効果があることを確認した。

の路線データを用いて、先行列車の発遅延により続行列車の着遅延が発生し始める数秒間においては、運転時隔優先の適用により続行列車における下位現示による減速を低減でき、列車遅延の低減に効果を見込めることを確認した。

5. まとめ

5.2 今後の課題

5.1 まとめ

運転時隔を短縮可能な運転方法の提案と、複数の観点による運転方法の比較評価方法を構築した。得られた結果を、以下にまとめる。

本研究で構築した運転時隔を短縮可能な運転方法を、異なる線路条件や走行条件、先行列車の遅延が増大した場合へ適用し、その効果を確認する必要がある。また、本研究では停車列車に関する検討を行ったが、通過列車を含めた運転時隔の検討も必要である。

- (1) 先行研究にて提案した接近可能点速度を低下させる運転方法をもとに、運転時隔を短縮可能とする運転方法を構築した。
- (2) 運転時分、運転時隔、消費エネルギー量、ノッチ切換え回数の 4 つ観点から、運転方法を比較する方法を構築した。実際の路線データを用いて、運転時分優先、運転時隔優先、省エネ優先の 3 とおりの運転方法を比較評価した。この結果、構築した比較評価方法を用いることで、複数の評価項目への影響度合いをもとに、対象とする路線における各運転方法の適用結果を定量的に検討できることを確認した。
- (3) 列車運行・旅客行動シミュレータに、運転方法を再現する機能を組み込み、運転方法の違いが列車ダイヤに与える影響を列車遅延で評価可能とした。実際

文献

- 1) 山下修：特集 鉄道総研 運転曲線図と運転曲線作成システム「SPEEDY」、運転協会誌, Vol.48, No.3 pp.1-4, 2006
- 2) 武内陽子, 坂口隆, 熊澤一将, 國松武俊, 佐藤圭介：運転曲線レベルで再現可能な列車運行シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.28, No.4, pp.41-46, 2014
- 3) 熊澤一将：自動閉そく区間における運転時分と運転時隔の変動に関する検討, J-RAIL2016 予稿集, S5-3-2, pp.595-598, 2016
- 4) 熊澤一将, 佐藤圭介, 小川知行：局所的な省エネ運転操作を組み合わせた省エネ運転支援システムの開発, 電気学会論文誌 D, Vol.135, No.135, pp. 368-375, 2015
- 5) 小川知行, 近藤稔：電車の消費エネルギーを計算する, RRR, Vol.66, No.3, pp.14-17, 2009