

グラフ理論に基づく駅間の信号機区間単位での列車運行のモデル化手法
A method for modeling train operation between stations
divided into signal sections based on graph theory

高瀬 翼[†] 國松 武俊[†]
Tsubasa Takase Taketoshi Kunimatsu

1. はじめに

列車ダイヤは、トラブル等のない通常運行時に列車遅延が生じないように、駅間走行時分や駅停車時分を適切に見積もり、これらに適宜の余裕時分を加えて作成されている。しかし、輸送障害により運転見合わせや速度規制が行われた場合は、列車遅延が生じることとなる。この列車遅延は、当該列車や当該区間だけではなく、後続列車など線区の広範囲にわたって波及し、長時間継続することがある。

輸送障害発生後の列車ダイヤを早期に回復させる方法の一つに、線路の線形変更や信号機の位置変更といった設備改良により、運行可能な最小の列車間隔を短縮することで、後続列車への遅延の波及を抑制する方法がある。特に、列車密度が多い線区において、ソフト的なダイヤ調整が限界の場合に有用な方法である。一方で、設備改良は長期間の工期と多大な費用を要することから、設備改良が特に求められる箇所限定して取り組むことが望ましい。

設備改良施策の検討にあたっては、列車運行シミュレーションが用いられることが多い。しかし、これまでに提案された手法では、設備改良が効果的な箇所を詳細に特定出来ないという課題があった。

そこで本研究では、遅延対策のために設備改良すべき箇所を駅間の信号機区間単位で抽出することを目的として、各列車の運行を信号機区間単位でシミュレーションし、その結果を分析する手法を検討する。

2. 関連研究

列車ダイヤや信号設備の変更時の列車運行を推定する手法として、信号に従う運転曲線を随時推定し、各列車の位置・速度・加減速を予測する *Microscopic model* による列車運行シミュレータ [1] が提案されている。この手法は、設備改良前後の詳細な列車遅延の比較や効果検証に優れている一方、多くのデータを必要とし、計算に長時間を要するという課題がある。

対極的に、少ないデータかつ短時間で計算可能な列車運行推定手法として、*Macroscopic model* と呼ばれる、列車ダイヤをグラフネットワークとして取り扱い、各列車の駅発着時刻を連鎖的に計算する列車運行シミュレータ [2][3] が提案されている。この手法は、比較的少ないデータで、短時間で計算可能なほか、遅延回復の妨げとなるボトルネック箇所を駅や番線単位で定量的に抽出することができる。その一方、信号機区間単位などの詳細なボトルネック箇所は特定できないという課題がある。

また、前述の 2 つの手法を組み合わせた、*Mesoscopic model* と呼ばれる手法 [4] も提案されている。この手法では、駅間に存在する信号機単位で列車ダイヤをグラフネットワーク化することで、信号機区間単位で列車の動きをシミュレーションすることを提案している。しかし、提案手法を用いたシミュレーション結果と他手法による結果との相違点や、結果の具体的な活用方法については論じられていない。

本研究では、*Macroscopic model* に対応する、駅発着をイベントとしたモデル（以降、「駅単位モデル」とする）と、*Mesoscopic model* に対応する、駅発着に加えて駅間の信号機通過をイベントとしたモデル（以降、「信号機単位モデル」とする）の 2 つに基づく列車運行シミュレーションを作成し、仮想線区データを用いたケーススタディによって両者の相違点を分析する。さらに、信号機単位モデルの結果を活用することで、設備改良すべき箇所が抽出できることを示す。

3. グラフ理論に基づく列車運行シミュレーション手法

3.1 列車運行シミュレーション

列車運行は、運転ダイヤや信号現示に従って行われる。遅延時においても、ダイヤ変更が行われない限り、各列車は事前に定められた運行区間、順序で運行され、駅間運転時分は最速で運転した場合の最小運転時分以上であり、続行して運行される列車同士の間隔は最小運転時分以上である。このことから、各列車の駅発着や信号機通過などのイベントをノードとし、ノード間を結ぶアークを駅間運転時分や運転時隔などの列車運行に関する条件に対応付けて設定することで、ダイヤ全体の各列車の一連の動きを有向グラフで表現することができる [2]。

この有向グラフに対して、*Program Evaluation and Review Technique (PERT)* [5] を適用することで、トラブル等による遅延発生時の列車運行シミュレーションが可能である。*PERT* は、プロジェクトマネジメント手法の一つで、実行順序に従って連鎖するイベントについて、各イベント完了までに必要な時間を分析することで、プロジェクト全体または目的とするイベントの最早完了時間、およびそのときの連鎖経路を分析する手法である。

3.2 駅単位モデル（駅発着をイベントとしたモデル）

駅単位モデルでは、各列車・各駅の到着および出発をそれぞれ 1 つのイベントとみなし、対応するノードを設定する。また、列車が計画ダイヤ時刻より早着、早発しないことを表現するため、値が 0 の時刻基点ノードを設定する。

[†] 公益財団法人鉄道総合技術研究所
Railway Technical Research Institute

さらに各ノードを結ぶアークとして、以下に示す 7 種類の運転条件を考慮し、各イベントに対する最早完了時刻を求める。なお、アークの重みは各項目名の値とし、アークが結ぶ対象のノードを(起点→終点)として表記する。

- (A) 指定出発時刻 (時刻基点→駅出発)
- (B) 指定到着時刻 (時刻基点→駅到着)
- (C) 駅停車時分 (駅到着→駅出発)
- (D) 駅間走行時分 (駅出発→次駅到着)
- (E) 発着時隔 (前列車の駅出発→次列車の駅出発)
- (F) 発着時隔 (前列車の駅出発→次列車の駅到着)
- (G) 着着時隔 (前列車の駅到着→次列車の駅到着)

以上のアークのうち、(A)~(D)は単一の列車の条件によって定まり、他の列車による影響を受けない場合の運行を模擬するもの、(E)~(G)は 2 つの列車の条件によって定まり、駅発着時において前列車との運行間隔を模擬するものである。

3.3 信号機単位モデル (駅発着と信号機通過をイベントとしたモデル)

信号機単位モデルでは、各列車・各駅の到着および出発に加えて、各列車・各信号機の通過をイベントとみなす。ここで、前後 2 つの信号機に挟まれた区間を「閉そく区間」、列車先頭が閉そく区間手前の信号機を通過したときを「閉そく進入」、列車後部が閉そく区間末端の信号機を通過したときを「閉そく進出」と呼ぶこととする。そして、1 つの信号機について、次の閉そく区間に対する進入イベントと、前の閉そく区間に対する進出イベントの 2 つのイベントを、各列車に対して設定する。

各ノードを結ぶアークとして、3.2 節の(A)~(C)の 3 種類の運転条件に加えて、以下に示す(H)~(N)の 6 種類の運転条件を考慮し、各イベントに対する最早完了時刻を求める。なお、アークの重みは各項目名の値とし、アークが結ぶ対象のノードを(起点→終点)として表記する。図 1 にノードおよびアークの設定イメージを示す。

- (H) 閉そく区間走行時分 (閉そく進入→次閉そく進入)
各列車の閉そく区間走行時分は、閉そく区間および閉そく区間の前後の駅通停パターンに加えて、信号現示により定まる最小走行時分以上とする。
- (I) 駅進入時分 (閉そく進入→駅到着)
各列車の駅進入時分は、駅・番線および駅通停パターンに加えて、信号現示により定まる最小走行時分以上とする。

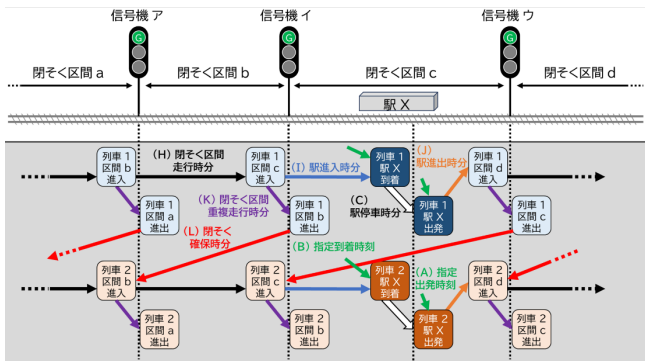


図 1 信号機単位モデルのイメージ

- (J) 駅進出時分 (駅出発→次閉そく進入)
各列車の駅進出時分は、駅・番線および駅通停パターンに加えて、信号現示により定まる最小走行時分以上とする。
- (K) 閉そく区間重複走行時分 (閉そく進入→前閉そく進出)
1 列車が 2 つの閉そく区間にまたがって走行する時分は、閉そく区間および閉そく区間の前後の駅通停パターンに加えて、信号現示により定まる最小走行時分以上とする。
- (L) 閉そく確保時分 (前列車の閉そく進出→次列車の閉そく進入)
前列車が閉そく区間を進出後、次列車が同じ閉そく区間に進入するまでの時分は、閉そく区間により定まる最小時分以上とする。
本アークにより、1 つの閉そく区間に複数列車が在線することを許容しない。
- (M) 出発制御時分 (前列車の駅端閉そく進出→次列車の駅出発)
複数の番線をもつ駅では、前列車が駅端の閉そくを進出してから次列車が駅を出発するまでの時分は、駅・番線および駅通停パターンにより定まる最小時分以上とする。
本アークにより、前列車が駅端の閉そくを進出するまでは、次列車は駅から出発しない。

特に、(H)~(K)は、前列車との位置関係である信号現示によってアークの値が変動する。図 2 に、信号現示による(H)閉そく区間走行時分アークの値変更例を示す。ここでは列車 1 が閉そく区間 b に進入するときを示している。前列車が閉そく区間 d に在線している場合(ケース①)は、信号機アは進行現示となることから、閉そく区間走行時分は最高速度に基づく値(最小走行時分)となる。前列車が閉そく区間 c に在線している場合(ケース②)は、信号機アは注意現示となることから、閉そく区間走行時分は注意現示の指示速度に基づく値となり、ケース①に比べて大きな値となる。なお、前列車が閉そく区間 b に在線している場合は、信号機アは停止現示となることから、(H)閉そく区間走行時分アークではなく、(L)閉そく確保時分アークにより列車間隔を模擬する。

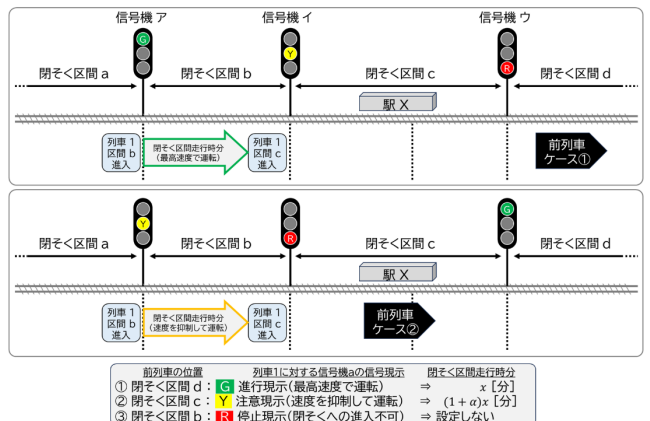


図 2 信号現示 (前列車との位置関係) による閉そく区間走行時分アークの値変更例

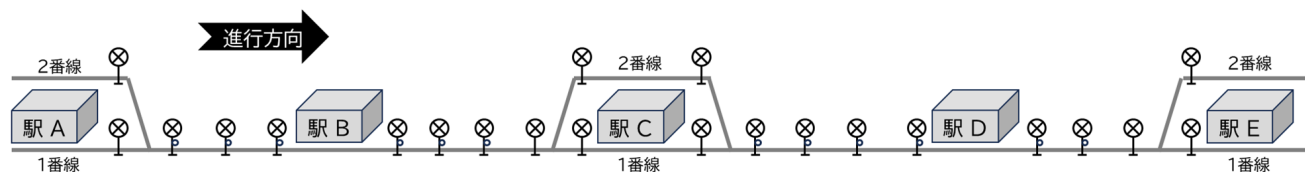


図 3 ケーススタディ路線概要

4. ケーススタディ

4.1 対象路線と適用条件

本研究では、仮定の路線データおよび輸送障害事例を用いて、駅単位モデルと、信号機単位モデルの、2つの列車運行シミュレーション結果を比較する。

対象路線は図3に示すとおり、駅A・駅C・駅Eの5駅からなる複線路線とし、うち駅A・駅C・駅Eは2つの番線および出発・場内信号機をもつ駅であるが、駅B・駅Dは番線が1つであり出発・場内信号機をもたない停留場である。本研究では駅Aから駅Eに向かう片方向のみの列車運転に着目する。

この路線に対して、3.2節・3.3節にて記した各種アークを設定するための最小時分をそれぞれ設定した。あわせて、設定した各種アークの最小時分をもとに、駅間走行時分や駅停車時分に対して余裕時分を加えた上で、図4に示す計画ダイヤを作成した。作成したダイヤは、駅A・駅Eに停車する急行列車（橙色）、駅A・駅C・駅Eに停車する快速列車（青色）、全駅に停車する普通列車（黒色）からなる1時間ヘッドのパターンダイヤであり、駅Cにて急行・快速が普通の追い抜きを行う。ここで、作成した計画ダイヤについて、駅単位モデルおよび信号機単位モデルともに、列車運行シミュレーションの実行結果において、列車遅延が生じていないことを確認している。

この計画ダイヤに対して輸送障害シナリオとして、快速1007R列車を駅Cにて30分出発抑止させる（計画ダイヤでは10時34分発であるが、11時04分発に変更する）。この運行条件を課した場合における、各列車・各駅発着および各信号機通過の時刻を列車運行シミュレーションにより計算するとともに、遅延の波及および回復状況の違いについて確認する。なお、列車の連休や発着順序変更等の運転整理は行わないものとする。

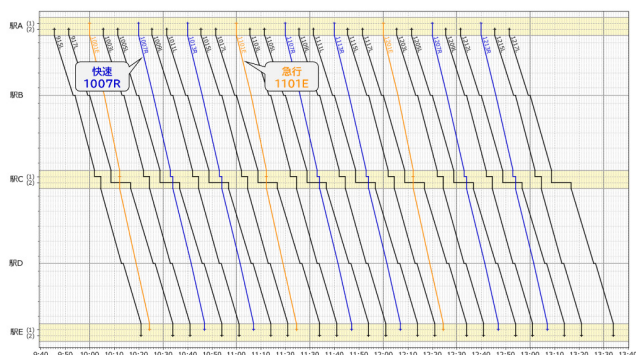


図 4 計画ダイヤ

4.2 結果

列車運行シミュレーションを行った結果のダイヤ図を図5に示す。図中の点線は駅単位モデルを、実線は信号機単位モデルを用いたときの結果を示す。なお、信号機単位モデルについては、各駅の着発時刻だけでなく、各信号機の通過時刻についても、列車スジの描画に反映させている。

両モデルとも、駅Cでの快速1007R列車出発抑止に伴って、駅B・駅C間で10時30分頃から11時20分頃まで列車スジの傾きが大きく駅間走行時分が増大している状況、および駅C・駅E間で11時10分頃から12時頃まで列車間隔が詰まっている状況が確認できる。

一方で、駅単位モデルと信号機単位モデルでは各列車の駅発着時刻が異なっている。一例として、抑止対象の快速1007R列車から約40分後の急行1101E列車のシミュレーション結果の時刻表を表1に示す。以下に、シミュレーション結果に差異が出た要因について、特に駅Bおよび駅Dの通過時刻に着目して、図5と表1から考察する。

駅Bの通過時刻について、信号機単位モデルでは駅単位モデルと比較して、4分遅い結果となった。これは図中の信号機ウ以降において差異が生じた結果である。駅単位モデルでは、駅Cの(F)発着時隔および(G)着着時隔に制約される以外は、列車は前詰めで運行される。一方で信号機単位モデルでは、各閉そく区間には1列車しか在線できないことを制約されることから、先行の普通1017L列車の影響により信号機エ通過時刻が11時08分となった。なお、信号機エから信号機クの間では、注意現示により閉そく区間走行時分が増大している。

駅Dの通過時刻について、信号機単位モデルでは駅単位モデルと比較して、約7分遅い結果となった。これは図中の信号機サ以降において差異が生じた結果である。駅単位モデルでは、駅間走行中に列車間隔が通常よりも狭くなっても、信号現示を陽に考慮せず、駅D到着時に先行列車と発着時隔以上の間隔が確保できる時分で走行することを想定している。一方で信号機単位モデルでは、駅間で列車間隔が詰まっている場合は、信号現示が進行現示ではなく注意現示となることから、閉そく区間走行時分が増大する。故に、信号機サから信号機セの間で約7分の差異が生じている。さらに、1101Eの周辺の列車についても、駅Dまでは駅間走行時分が増大している一方で、駅D以降は増大が見られないことから、駅D付近の信号機が列車運行のボトルネック箇所となっていることがわかる。

ここで、駅Dは場内・出発信号機をもたない停留場であり、信号機セと信号機ソの間の1つの閉そく区間内に存在する。そのため、先行列車が信号機ソを通過するまでは信号機セの信号現示が変わらないことに加えて、信号機セに注意現示で進入した場合は、駅D停車後も信号機ソを通過するまでは注意現示が継続する。したがって、先行列車が駅Dに停車する場合は、後続列車は信号機セやその手前から遅延が生じやすい状況にあると考えられる。

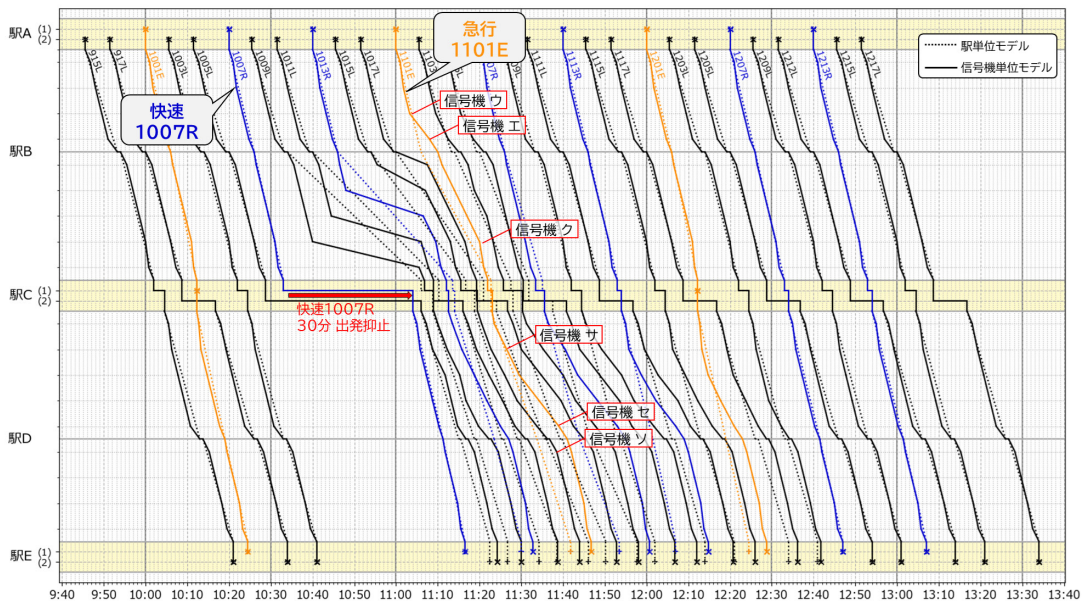


図 5 列車運行シミュレーション結果 (ダイヤ図)

表 1 急行 1101E 列車のシミュレーション結果 (時刻表)

	駅単位モデル	信号機単位モデル
駅 A	発 11:00:00	11:00:00
駅 B	(通) 11:06:00	11:10:00
駅 C	(着) 11:22:45	11:22:00
	発 11:22:45	11:23:00
駅 D	(通) 11:33:45	11:41:00
駅 E	着 11:41:45	11:46:45

4.3 設備変更を想定したシミュレーション結果

4.2 節の結果をもとに、駅 D に関連する信号機位置の変更として、信号機ソを駅 D 側へ移設する設備変更を想定して、再シミュレーションを行った。この設備変更は、駅 D 出発から信号機ソまでの所要時間を短縮するねらいがある。再シミュレーションを行った結果のダイヤ図 (一部抜粋) を図 6 に示す。駅単位モデルの結果には変化はない一方で、信号機単位モデルでは、駅 D より手前の駅間所要時間や列車間隔が改善される結果となった。具体的には、急行 1101E 列車の駅 D 通過時刻は 11 時 39 分 45 秒となり、遅延が 1 分 15 秒減少する効果を確認した。

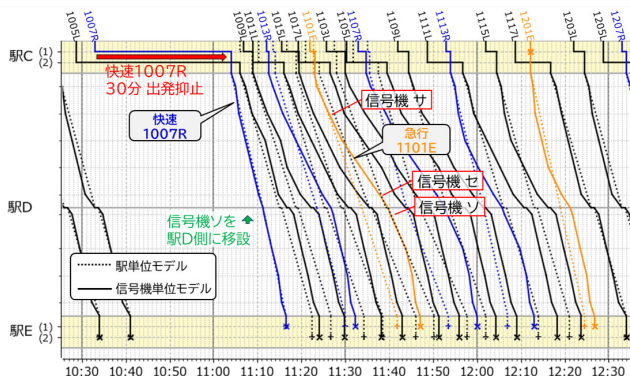


図 6 設備変更想定後のシミュレーション結果

5. まとめ

本研究では、遅延対策のために設備改良すべき箇所を駅間の信号機区間単位で抽出することを目的として、グラフ理論に基づく列車運行シミュレーションのモデル化手法を検討した。具体的には、駅発着をイベントとした駅単位モデルと、駅発着に加えて駅間の信号機通過をイベントとした信号機単位モデルの 2 つを作成し、仮想線区データを用いたケーススタディにより両者を比較した。その結果、信号機単位のモデル化を行うことにより、列車遅延に大きく影響している区間、およびその要因について詳細に特定できることを確認した。加えて、特定した区間に対して設備変更を実施した場合を想定し、再シミュレーションを行うことで、設備変更前後での遅延量の変化が試算できることを確認した。

今後は、信号機単位モデルによる列車運行シミュレーションについて、Microscopic model シミュレーションとの結果比較や実路線データを用いた計算に取り組む予定である。

参考文献

- [1] 武内陽子, 坂口隆, 熊澤一将, 國松武俊, 佐藤圭介: 高機能な列車運行・旅客行動シミュレータの開発と列車運行の多面的評価, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.135, No.4, pp.411-419, 2015
- [2] 安部恵介, 荒屋真二: 最長経路法を用いた列車運行シミュレーション手法, 情報処理学会論文誌, Vol.27, No.1, pp.103-111, 1986
- [3] 高瀬翼, 國松武俊: 遅延回復力向上のための設備改良箇所の抽出手法, 第 30 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-Rail 2023), S5-1-3, 2023
- [4] Y. Watanabe, Y. Ochiai and N. Tomii: "A Mesoscopic Train Traffic Simulation Algorithm considering Running times of Block Sections", The International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems (STECH 2015), 1F13, 2015.
- [5] 関根智明: PERT・CPM, OR ライブラリー-11, 日科技連, 1973