

高頻度運行の複々線区間における折り返しを考慮した運転整理

福地 正樹* 古関 隆章 (東京大学大学院)

Rescheduling highly frequency train operation on quadruple tracks considering turn-around terminal constrains

Masaki Fukuchi* and Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Train rescheduling during disrupted service is a substantially significant task for urban railway operators. This task typically depends on the experiences. Operators have requested assistance by a system. The authors propose a train rescheduling system for the assistance. The system simulates and proposes a possible operation after an accident. The system calculates simultaneously passengers' flow in the proposed train operation and evaluates the goodness of the operation. In addition, the authors have implemented a function of automatic local minimization of the evaluation criteria by applying timetable alternation. A case study in this paper shows the effective of their functions.

キーワード：列車運行, 乗客流解析, 時刻変更, 運転整理, スケジューリング
(train operation, passenger-flow analysis, timetable alteration, train dispatch, scheduling)

1. はじめに

運転整理と呼ばれる列車ダイヤの乱れを元に戻す作業は、指令員の重要な仕事の1つである。その作業は、現在、彼らの経験と勘に基づいており、車両性能、列車位置、客の要望などを勘案する必要があり、とても難しいものとなっている。よって、高速、高密度の都市部の鉄道において、コンピュータによる運転整理支援が求められている。

我々は、複々線区間における運転整理支援システムを作成している。今回、我々は、列車遅延発生時において発車時刻を遅らせる2つの運転整理アルゴリズムを実装した。1つは、駅間停車を防ぐものであり、もう1つは乗客視点で列車間隔を調整するものである。本論文では、それらのアルゴリズムを提案し、ケーススタディーを通じて、ともに乗客の視点で運転整理になっていることを示す。

2. システムの概要

本運転整理支援システムは、先行研究¹⁾に基づき、列車ダイヤ案を作成し、そのダイヤ案を評価する。列車ダイヤ案を作成する部分では、計画時刻や各種制約条件から列車の走行する線路や列車の出発、到着時刻が決定される。ダイヤ案を評価する部分においては、乗客の行動を推定し、乗客の感じる損失で評価値が計算される。ダイヤ案は、評価値に基づいて判断され、ダイヤの作成と評価が繰り返されるようになっている。そして、指令員に運転整理案が提示さ

れる。図1にコンピュータによる運転整理支援システムの構成を示す。

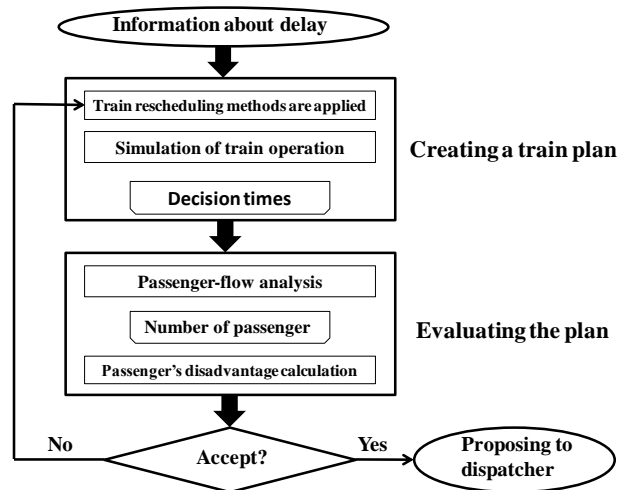


図1 システムの構成

Fig.1 Flow chart of the proposed train rescheduling system

3. 運行シミュレーション

列車ダイヤ案を作成する部分では、さらに、運転整理を適用する部分と列車の運行をシミュレーションする部分に分けることができる。今回、運転整理については実際に行っていないので、運行シミュレーションについて紹介する。

〈3.1〉 列車運行の制約条件

列車運行には様々な制約が存在する。運行シミュレーションでは、全ての厳しい条件を満たす到着や発車の時刻を決定する必要がある。今回、先行研究⁽²⁾に基づき、列車運行を表すのにグラフ理論を用いる。ノードは、各列車の到着や発車を表し、リンクは以下で表すような規制を表す。

〈3.1.1〉 計画時刻

列車の運行は、予め計画されたダイヤ通りに運行することが基本である。この制約では、決められたダイヤより早発したり到着したりしないようにするための制約である。

〈3.1.2〉 駅間所要時間

特急や急行、普通等列車種別及び車両の走行性能毎に駅間の最低限かかる走行時間が予め決められている。リンクの重みは、最低限かかる走行時間である。

〈3.1.3〉 停車時間

乗客の乗降のためにはある程度の停車時間が必要である。リンクの重みは、最小停車時間である。通過するとき、リンクの重みは0である。

〈3.1.4〉 進路支障

進路を支障されている状態では列車の運行が不可能である。リンクの重みは、進路が支障されている時間である。

〈3.1.5〉 閉塞

駅間で走れる列車の本数は制限される。リンクの始点は、到着ノードであり、ノードの終点は制限された本数後の列車の前駅出発ノードである。リンクの重みは0である。

〈3.2〉 列車運行シミュレーション

到着及び発車時刻を表現している各ノードに対して最長経路探索することにより、経路の長さで列車の発着時刻を表すことは可能である。最長経路探索にはPERT法を用いる。図2に列車運行シミュレーションの例を示す。

〈3.3〉 列車遅延時の列車運行シミュレーション

事故を模擬するには、事故発生箇所において、計画時刻に遅れのみだけ足し合わせればよい。今回、モデル路線について30分の遅れを模擬し、その後、特に運転整理を行わなかった場合のダイヤ（以降、詰めダイヤとする）のシミュレーション結果を図3に示す。事故箇所には、×を記してある。また、点線は計画ダイヤを表している。

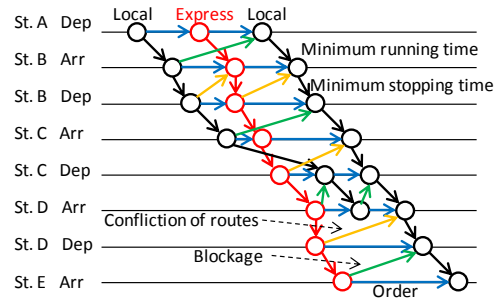


図2 運行シミュレーション

fig.2 An example of a graph representing train operation

〈4.1〉 評価値の定義

評価値は、各損失の線形和で表される。損失及び評価値の単位は[人・秒]である。 L は評価値、 L_1 は所要時間による損失、 L_2 は混雑による損失、 L_3 は乗換の損失、 L_4 は駅での待ち時間に感じる損失、 L_5 は駅間走行時間の延長に感じる損失を表す。

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \quad (1)$$

〈4.1.1〉 所要時間による損失

乗客が駅に着いてから目的の駅に到着するまでの時間を表し、駅での待ち時間も含まれる。

$$L_1 = \sum_{i=1}^N t_i \quad (2)$$

ただし、 N は全体の乗客数、 t_i は乗客 i の所要時間を表す。

〈4.1.2〉 混雑による損失

混雑した列車に乗車すると乗客は不快に感じる。これを時間換算の損失として表す。

$$L_2 = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=1}^{S_k} f_c \left(\frac{q_{ks}}{c_{ks}} \right) q_{ks} t_{ks} \quad (3)$$

ただし、 n は駅数、 S_k は駅 k に到着する列車本数、 f_c は図4に表す係数⁽³⁾、 c_{ks} は駅 k に s 番目に到着する列車の定員、 q_{ks} は駅 k に s 番目に到着する列車の乗車人員、 t_{ks} は駅 k に到着する列車の前の駅からの所要時間を表す。

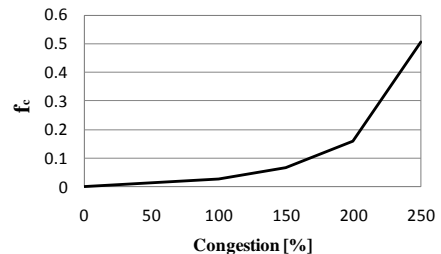


図4 混雑率と混雑損失係数の値

Fig.4 Coefficient for representing supplementary cost caused by congestion

4. ダイヤの評価

従来、列車の遅延時間の合計で評価されてきたが、乗客の感じる損失で列車ダイヤを評価することが提案されている⁽¹⁾。本章では、乗客の感じる損失についての定義を示す。

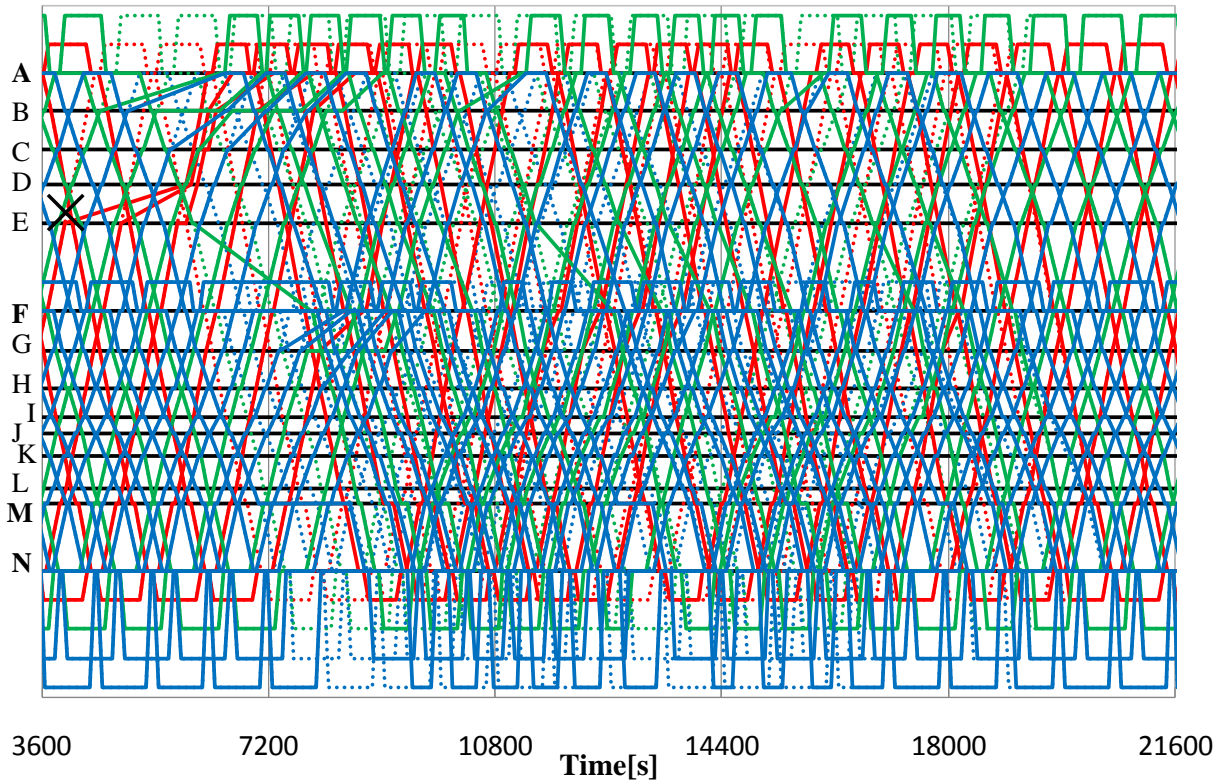


図3 事故時の運行シミュレーション結果
Fig.3 Simulation of train operation in accident

〈4.1.3〉 乗換による損失

乗換による乗客の感じる負担を時間換算した損失を表す。

$$L_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} r_{ij} \quad (4)$$

ただし、 M_i は乗客 i の乗換回数、 r_{ij} は乗客 i の j 回目の乗換換算値を表す。

〈4.1.4〉 駅での待ち時間に感じる損失

駅での待ち時間に感じる不快感を時間換算した損失で表す。

$$L_4 = w_c \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{S_i} w_{ij} \quad (5)$$

ただし、 w_c はこの損失の重み、 w_{ij} は乗客 i の駅 j での待ち時間か一定値を超える停車時間を表す。

〈4.1.5〉 駅間走行時間の延長に感じる損失

事故等が発生した時、駅間で長時間停車することはしばしば起こる。このとき乗客が感じる苦痛を時間換算した損失を表す。

$$L_5 = e_c \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^{S_k} e_{is} \quad (6)$$

ただし、 e_c は、この損失の重み、 e_{ij} は乗客 i の駅 j での駅間走行時間の延長時間を表す。

〈4.2〉 乗客の行動推定

乗客の行動推定においては、モデルに基づいて乗車する列車を決定する。この決定にはグラフ及び最短経路探索を使用する。

〈4.2.1〉 乗客流のグラフ

各停車ノードから、図5のように、同じ列車及び乗換元から乗換先へノード間にリンクを張る。

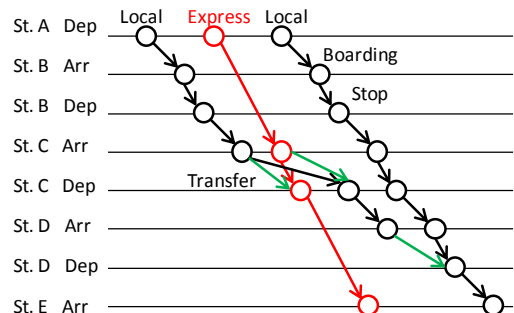


図5 乗客流のグラフ

Fig.5 An example of a graph representing passenger flow

〈4.2.2〉 乗客行動の仮定

先行研究⁽⁴⁾に基づき、駅には乗客は、一様に出発駅に到着し、目的地に向かうことを仮定する。また、目的地までは、混雑を除く損失が最小となるように定める。

$$L = L_1 + L_3 + L_4 + L_5 \quad (7)$$

経路探索については、ダイクストラ法を用いている。今回、先行研究⁽⁴⁾に基づいて、損失が最小となる経路を乗客は辿ると仮定する。また、先行研究⁽⁶⁾より事故時の乗客流解析において、事故発生前に列車に乗ろうとした旅客が事故を予見し、事故列車を避けて乗車するといった解析結果にならないよう、因果律を考慮する。

5. 時刻変更

列車遅延時は、列車の間隔が詰まりすぎて駅間に停車してしまうことがある。駅間の停車が長引くと、乗客にとって苦痛であり、気分が悪くなる乗客もいる。このようなことを防ぐためには、手前の駅で停車させる必要がある。今回、運行シミュレーションによって駅間で停車することが予測された列車に対し、前の停車駅で発車時刻を遅らせるアルゴリズムを実装した。その結果を示し、考察を述べる。

また、列車遅延時は、逆に列車の間隔が広がると、後続の列車に乗客が集中してしまうこともある。この場合、混雑による停車時間の増大によってさらに列車が遅れたり、駅で乗客が乗りきれず積み残しが発生したりしてしまうことが考えられる。よって、列車間隔を調整する必要がある。今回、先行研究⁽⁶⁾の考え方にに基づき、乗客の感じる損失を小さくするという観点から、発車時刻を遅らせるアルゴリズムを実装した。その結果を示し、考察を述べる。

(5.1) 駅間停車を防ぐための時刻変更

駅間停車を防ぐための時刻変更について、列車は駅間停車しそうな前の停車駅で時刻変更するものとしている。時刻変更のアルゴリズムを以下に示す。

- ① 事故発生直後から駅間停車しているリンクを乗客流のグラフで探索する。
- ② 該当箇所があれば駅間停車している時間だけ前の停車駅の発車時刻を遅らせる。
- ③ ①に戻り、該当するリンクがなくなるまで繰り返す。また、図 3 のダイヤに対して、本アルゴリズムを適用した結果のダイヤ（以降、抑止ダイヤとする）を図 6 に示す。なお、点線は詰めダイヤを表す。

(5.2) 列車間隔を調整するための時刻変更

先行研究⁽⁶⁾においては、所要時間損失が小さくなるように停車駅での追加停車時間を決定することを提案している。今回、我々の研究では待ち時間に感じる損失も考慮しているので、その点も考慮して、乗客の行動別損失増加を示す。①時刻変更前のダイヤにおいて V 駅で下車予定だった乗客の総損失の合計 F_1

$$F_1 = (1 + w_c) \sum_{V=I+1}^T P_V \left(x - \sum_{a=I+1}^{V-1} \tau_a \right) \quad (8)$$

②時刻変更によって乗車列車が変更になり、乗換をせずに T 駅までに下車した乗客 F_2

$$F_2 = (1 + w_c) \sum_{U=I}^{T-1} \sum_{V=U+1}^T p_{UV} \left(x - \sum_{a=I+1}^U \tau_a \right) \left(x - \sum_{a=I+1}^{V-1} \tau_a \right) \quad (9)$$

③時刻変更によって乗車列車が変更になり、 T 駅までに別列車に乗り換える乗客 F_3

$$F_3 = -(1 + w_c) \sum_{U=I}^{T-1} \sum_{V=U+1}^T q_{UV} H_{UV} \left(x - \sum_{a=I+1}^U \tau_a \right) \quad (10)$$

④時刻変更によって乗車列車が変更になり、 T 駅以降も利用する乗客 F_4

$$F_4 = -(1 + w_c) \sum_{U=I}^{T-1} \sum_{V=T+1}^Z (p_{UV} + q_{UV}) H_{UV} \left(x - \sum_{a=I+1}^U \tau_a \right) \quad (11)$$

これらの合計が評価値の増加分 F とすると、

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (12)$$

となる。ただし、 I は調整実施駅、 T は I 駅からの余裕時分の合計によって調整時間が吸収できる駅、 Z は終着駅、 P_V は V 駅で下車した乗車人員、 p_{UV} は U 駅から V 駅を乗換せずに利用する単位時間当たりの乗車人員、 q_{UV} は U 駅から乗車し、 V 駅で乗換のために降車する単位時間の乗車人員、 H_{UV} は後続列車を待った時との損失の差である。 x は調整実施駅 I 駅を遅らせて発車させる時間（以降、調整時間とする）とする。 τ_a は、 a 駅での停車余裕時分である。

ここではダイヤで設定されている走行余裕時分によって、遅延させる列車のダイヤを回復させない、他列車の停車駅への到着を遅らせることのない程度に時刻変更を行うと仮定する。また、時刻変更で乗換列車が変化することについては考慮していない。

停車余裕時分であるが、定めた仮定の下で正確に算出するには、列車運行シミュレーションをする必要がある。今回、式の係数決定の過程で列車運行シミュレーションを行わないために、停車余裕時分を式から無くせるように、停車余裕時分があると期待される区間で計算を区切る。また、乗客数の再計算する回数を減らせるように、時間順とは逆から調整時間を求めることとする。調整する算出ための式は、式(12)が最小となればよいので、

$$x = \frac{-(1 + w_c) \sum_{V=I+1}^T P_V + \sum_{U=I}^{T-1} \sum_{V=U+1}^Z (p_{UV} + q_{UV}) H_{UV}}{2(1 + w_c) \sum_{U=I}^{T-1} \sum_{V=I+1}^U p_{UV}} \quad (13)$$

x は、5秒単位で丸めるものとする。以上より、アルゴリズムを示す。

- ①到着の遅れが発生して最も遅い到着時刻の直前から停車余裕時分がありそうなところ及び折り返し駅を該当箇所とし、時間とは逆順に探索する。
- ②該当箇所を T 駅とし、 T 駅前の停車駅を I 駅として x を算出し、 x が 0 や負のときは I 駅を前の停車駅に順に変えていき、 x が正になるか該当箇所に当たるまで繰り返す。
- ③ x が正ならば x の値で他の列車の停車駅の到着が遅れないか調べ、遅れるときはその分だけ x を小さく修正する。
- ④ x の分だけ T 駅で該当列車の発車を遅らせる。
- ⑤ 事故発生時刻まで繰り返したら、乗客流解析を行い、①に戻って、該当箇所がなくなるまで繰り返す。

アルゴリズムを適用した結果のダイヤを図 7 に示す。ただし、点線は抑止ダイヤである。また、式 6 の w_c は文献(7)を参考に 0.2、式 5 の r_{ij} は、同じ線路を走る列車同士は文献(7)を参考に 5 秒、違う線路を走る列車同士は文献(8)から 5 秒ではあまりにも小さいことと判断し、120 秒とした。式 7 の e_c は、1 とした。

(5.3) 時刻変更の考察

詰めダイヤ、抑止ダイヤ、調整ダイヤ 3 つの評価及び各損失の計画ダイヤとの差を比較したものを図 8 に示す。ここでは、抑止ダイヤと調整ダイヤについて考察を行う。

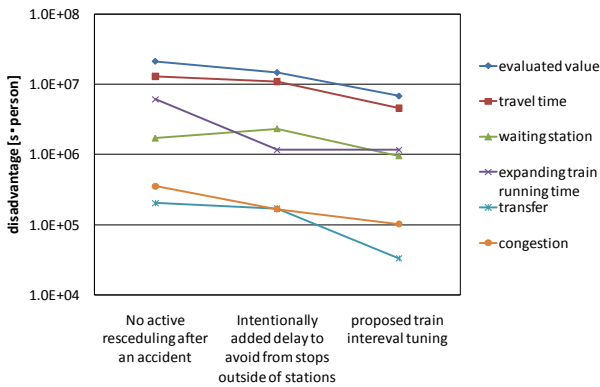


図 8 各損失及び評価値の比較
Fig.8 Comparing with timetables

(5.3.1) 抑止ダイヤの考察

図 8 より駅間走行時間の延長に感じる損失が詰めダイヤと比較して小さくなっている。この抑止ダイヤでの駅間走行時間の延長に感じる損失は、事故箇所のみとなっていることから、図 6 に示された抑止ダイヤは、駅間停車を防ぐ時刻変更のアルゴリズムが目的を果たしていることがわかる。

また、駅での停車中に来た乗客が後続の列車を待たずに乗れる分、所要時間損失も小さくなり、所要時間損失の割合が圧倒的に大きい評価値も下がった。ただし、駅での待

ち時間に感じる損失は詰めダイヤよりも大きくなった。これは、駅に長時間停車させるためであると考えられる。

(5.3.1) 調整ダイヤの考察

図 7 を見ると、抑止ダイヤにおいて大きな間隔が開いていたところにも列車が走っていることが分かる。列車間隔が揃うことにより、乗車する列車を駅で待つ時刻が減ったことが所要時間損失と待ち時間に感じる損失が小さくなった。これは、アルゴリズムの設計思想と結果が合致していることが分かる。また、所要時間損失の割合が圧倒的に大きい評価値も下がった。

また、混雑損失についても抑止ダイヤより小さくなっており、混雑が平準化していると考えられる。乗客の感じる損失を小さくするという観点から運転整理を行ったが、混雑による遅延防止も図れると考えられる。よって、混雑による増延を防止するための時隔調整のアルゴリズムにも使用できるものと思われる。

6. まとめ及び今後の予定

今回、運転整理の時刻変更について、駅間停車を防ぐためのものと列車間隔を調整するためのものの 2 つのアルゴリズムを提案、実装を行い、それぞれのダイヤの評価を行った。そして、これらの運転整理が乗客の視点から有効であることを確認した。今後、乗客視点でよい運転整理を行えるような順序変更や運転線路変更、運休といった運転整理手法の実装を行っていく。

文 献

- (1) Nagasaki Yusaku, Eguchi Makoto and Koseki Takafumi : "Automatic Generation and Evaluation of Urban Railway Rescheduling Plan", *Proc. of Int. Symp. on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems STECH '03* (2003 年)
- (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」, 情報処理学会論文誌, Vol.27, No.1, pp.103-111, (1986 年)
- (3) 国土交通省 : 「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2005」(2005 年)
- (4) Hara, K., Kumazawa, K. and Koseki, T. : "Efficient Algorithm for Evaluating and Optimizing Train Reschedules by Taking Advantage of Flexibility of Quadruple Track", *The Third International Conference on Railway Traction Systems (RTS2007)*, pp.91-97 (2007).
- (5) 大山大介、原和弘、古閑隆章 : 「判断の因果関係を正しく表現する列車運転異常時の乗客流推定法」, 平成 19 年電気学会全国大会, pp.137-138, (2007 年)
- (6) 原和弘、熊澤一将 : 「乗客流解析に基づく運転整理支援システムにおける整理案の効率的評価・最適化法」, 平成 19 年電気学会産業応用部門大会, pp. III 211-216 (2007 年).
- (7) 小林里紗、家田仁、柴崎隆一、寺部慎太郎 : 「利用者の利便性から見た非常時の運転整理ダイヤの評価」, 日本機械学会第 7 回鉄道技術連合シンポジウム, pp. 379-382 (2000 年).
- (8) 深澤紀子 : 「ダイヤ乱れ時における予測情報提供試験」, 第 232 回鉄道総研月例発表会講演要旨 (2010 年).

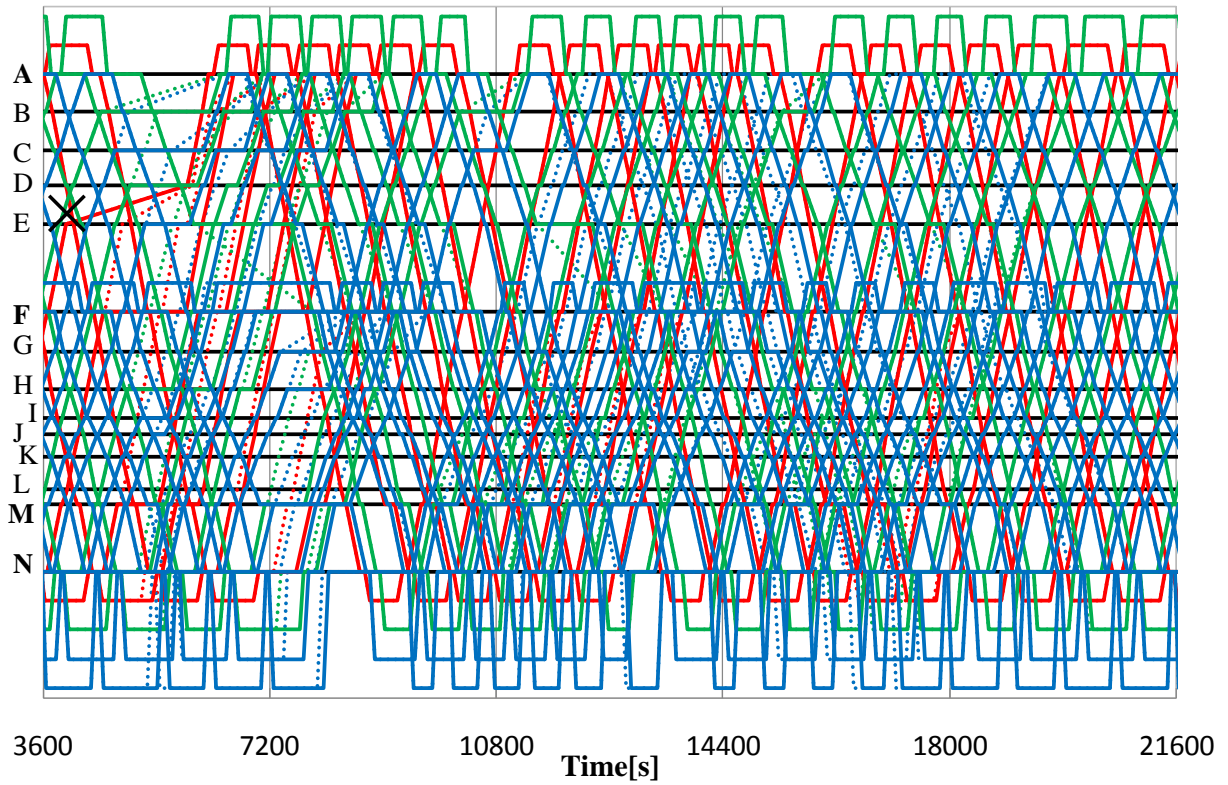


図 6 駅間停車を防ぐ時刻変更の適用結果

Fig.6 Simulation of train operation applied timetable alteration for preventing trains from stopping outside stations

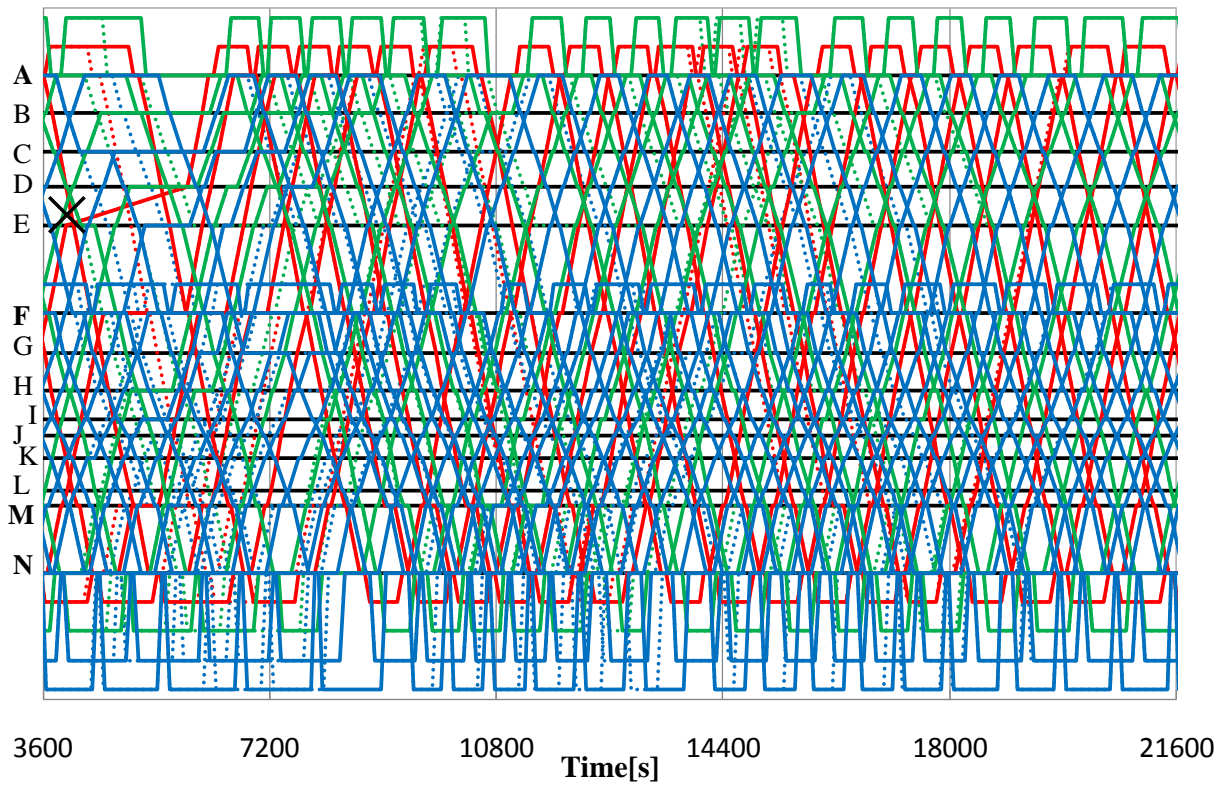


図 7 時刻変更の適用結果

Fig.7 Simulation of train operation applied timetable alteration