

—修士論文—

列車密度の高い都市部の複々線区間における  
大規模乱れ時の運転整理

Train rescheduling of highly frequent operation on an urban quadruple  
track line after a large disruption

平成 23 年 2 月 9 日提出

指導教員 古関隆章准教授

東京大学大学院工学系研究科  
電気系工学専攻修士課程  
学籍番号 37-096497

**福地正樹**

## 内容梗概

鉄道において乱れた列車ダイヤを正常に戻す作業を運転整理という。現在の運転整理は、経験のある指令員の判断に頼る部分が多く、とても負担の重い作業であることから、コンピュータによる支援が望まれている。先行研究より、乗客の立場に立った評価に基づいて運転整理案の作成を行う運転整理システムの開発を行っている。

本研究では、大規模乱れを扱うために、上下両方向を考慮した運転整理システムに拡張する。そのために、時隔調整や運行順序変更については大規模乱れ時の運転整理手法の提案を行い、ケーススタディを用いて、その有効性について述べる。また、運転線路変更と運休の運転整理手法について、その効果について述べる。

# 目次

## 第1章 序論

1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 本論文の内容	2

## 第2章 運転整理システムの概要

2.1 本論文で用いるモデル路線と計画ダイヤ	3
2.2 乗客視点でのダイヤの評価	4
2.3 運転整理システムの構成	6
2.4 列車運行シミュレーション	7
2.5 乗客行動シミュレーション	9
2.6 大規模乱れ時の折り返しを考慮した上下両方向の運転整理	14

## 第3章 抑止と乗客流を考慮した時隔調整

3.1 抑止と時隔調整	16
3.2 本システムにおける抑止のアルゴリズム	17
3.3 乗客流を考慮した時隔調整	18
3.4 抑止及び乗客流を考慮した時隔調整の適用効果	23

## 第4章 列車間隔を意識した運行順序変更

4.1 運行順序変更と番線変更	30
4.2 本システムにおける運行順序変更のアルゴリズム	31
4.3 番線変更の適用方法	37
4.4 運行順序変更及び番線変更の適用効果	38

## 第5章 大規模乱れ時に適用する運転整理

5.1 運転線路変更と運休	44
5.2 運転線路変更と運休の適用効果	45

## 第6章 結論

6.1 まとめ	49
6.2 今後の課題	49

謝辞	51
----	----

参考文献	52
------	----

発表文献	53
------	----

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

鉄道は、一度に大量の人が運べるため、日本では、都心の駅によっては、一日の利用客が100万人を越しており、都市部の移動には欠かせないものとなっている。日本の鉄道は、定時性に優れており、東海道新幹線では1列車あたりの遅延時間は1分を切り、0.5分程度である<sup>[1]</sup>。

しかしながら、輸送障害は、発生してしまっているのが、現状である。30分以上の大規模なダイヤ乱れを輸送障害と言うが、図1.1のように、日本で年間4000件以上発生している。平成17年度理由については、様々であるが、車両故障等部内要因が三分の一程度で、残りが自然災害や人身事故等の部外要因である<sup>[2]</sup>。

乱れた列車ダイヤを正常に戻す作業を運転整理という<sup>[3]</sup>。運転整理は、現在、彼らの経験と勘に基づいており、車両性能、列車位置、線路や駅、電力、信号といった設備上の制約、客の要望などを勘案する必要がある。特に輸送障害や運転事故等、運休区間が生じる、もしくは、生じなくとも大規模に列車のダイヤが乱れるようなときには、列車ダイヤの運転整理案の作成だけではなく、車両や乗務員の運用についても変更が発生するので、その変更案を考えることも求められる。また、このようなダイヤや運用に関する仕事以外に、車両に事故現場の状況把握や復旧についての関係各所との打ち合わせがあったり、運転整理案を現場社員や乗客に伝達し、必要ならば、係員を非難させたり、乗客のために振替輸送や代行輸送を手配したりする仕事もある。よって、とても負担の重い作業になっており、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<sup>[4]</sup>。

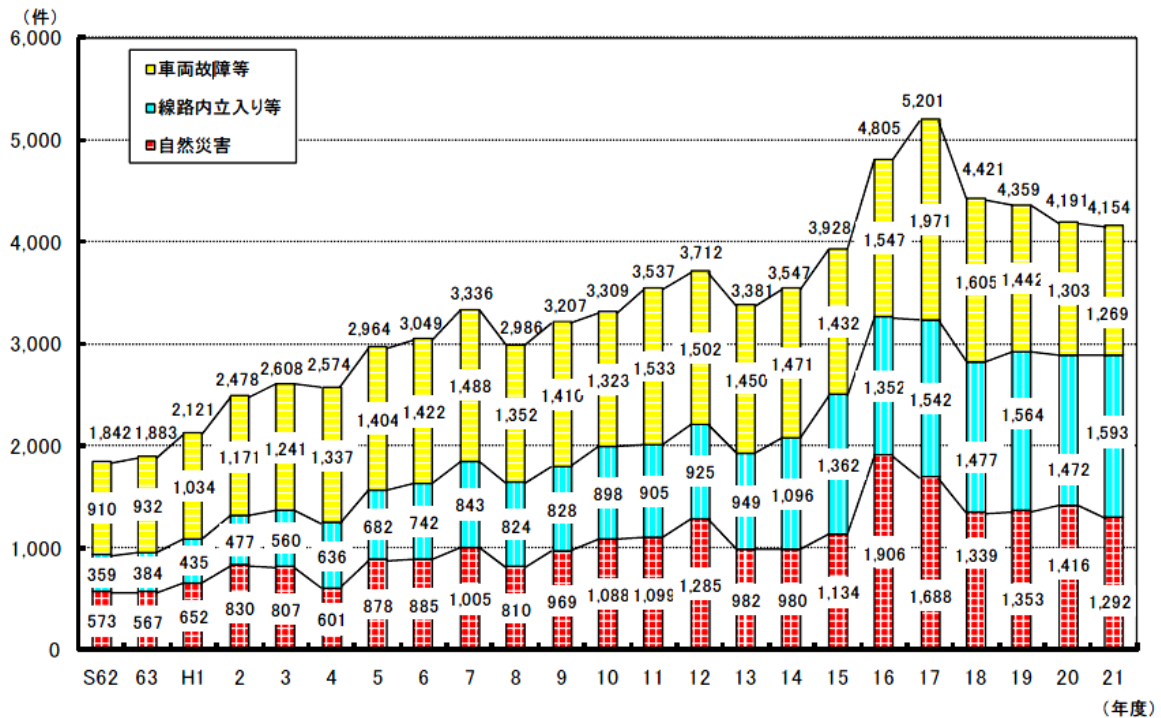


図 1.1 輸送障害発生数<sup>[2]</sup>

### 1.2 研究目的

先行研究<sup>[5][6]</sup>では、運転整理業務の完全な自動化は難しいと考え、指令員を支援するシステムの作成を行ってきた。システムの構成については第2章で詳しく述べるが、運転整理案を作成する部分と評価する部分から成り立っており、遅延が発生したダイヤに運転整理手法を適用することで、列車の運行計画を変更するアルゴリズムと、列車運行上の制約を満たすための列車運行シミュレーションを組み合わせることで運転整理案を作成し、作成されたダイヤ上で乗客がどのように行動するかを推定し、乗客の立場に立った運転整理案の評価を行うシステムの作成が行われている。

先行研究<sup>[7][8][9]</sup>においては、複々線区間について研究がなされてきた。しかし、これらは片方向のみであり、両方向に対応した運転整理について扱ってこなかった。片方向のみであると、折り返し先にも遅れが波及する程度に遅れているとき、片方向のみを考慮して運転整理を行うと、余計に反対側の列車の遅延を招いたり、反対側の列車の運行に支障をきたしたりする恐れがある。また、さらに大きい遅れが発生すると、折り返し先のさらに折り返し先の列車が遅れ、同じ方向を考慮したダイヤでも、その遅れは考慮できない。よって、運転整理が破綻するのは明白である。

本研究では、数十分以上の列車遅延が伴う大規模乱れを扱うために、上下両方向を考慮した運転整理システムに拡張や新たなシステムの提案を行う。そして、大規模乱れ時の運転整理について、ケーススタディーを通じて、乗客視点からの評価から、効果的な運転整理の手法について解明していく。

### 1.3 本論文の構成

本論文は、6つの章で構成されている。次に2章以降の内容について以下に示す。

はじめに、第2章において、本研究で用いる運転整理システムの概要を述べる。その中で、乗換を行いたくないという乗客の趣向を考慮した乗客流推定について述べる。また、第3章では、先行研究において片方向のみで考えられていた時隔調整について、両方向に拡張する。このとき、どのような時隔調整を両方向で効果的かつ効率的に行うアルゴリズムを提案する。第4章では、運行順序変更について、折り返し駅を特に考慮した効果的な手法について提案する。第5章では、運転線路変更を行い、ダイヤの早期回復や乗客視点での効果を示す。また、運休について、ダイヤの早期回復の効果とトレードオフとなる運休がどの程度評価を悪くするか示す。最後に、第6章で本論文の結論と今後の課題を示す。

## 第2章

### 運転整理システムの概要

本章では、本運転整理システムの概要を示す。特に、2.5章において、乗客の趣向を考慮した乗客流解析について、先行研究の問題点を指摘し、新たな乗客流解析を提案し、ケーススタディーに適用したときの結果を示す。また、本論文でケーススタディーとして用いる路線及びダイヤを2.1章で示す。

#### 2.1 本論文で用いるモデル路線とダイヤ

本論文で用いるのは、大都市圏の都市と都市を結ぶ路線である。図2.1にモデル路線の各種別の停車駅を示す。また、図2.2に計画ダイヤを3600秒から14400秒まで示す。赤が急行、緑が準急、青が普通を表す。以降のダイヤにおいても同様とする。他の時間帯も900秒つまり15分サイクルで運行しているものとする。利用状況だが、1番利用客が多いのはN駅であり、2番目に多いのがA駅である。この駅間で利用される乗客が圧倒的に多い。他は、急行が停車する駅と準急が停車するH駅の利用客が比較的多い。A駅からM駅まで複々線、M駅とN駅の間が複線となっている。複々線区間の外側線と内側線については、端のA駅とM駅の他にF駅で変えることが可能である。基本的に、急行列車が外側線を他の列車は内側線を走行する。ただし、準急は、A駅・F駅・M駅・N駅で急行と同じ番線で着発する。A駅では、普通 $\alpha$ がホーム上で折り返し、急行と準急は専用の折り返し線が1線ずつある。また、F駅では、普通 $\beta$ 専用の折り返し線が1線と予備の折り返し線が1線ある。今回、第5章では、その予備の折り返し線を使って運休の運転整理を行う。N駅では、全ての種別に専用の折り返し線が1線ずつある。車両だが、各種別専用であり、他の種別に転用できない。

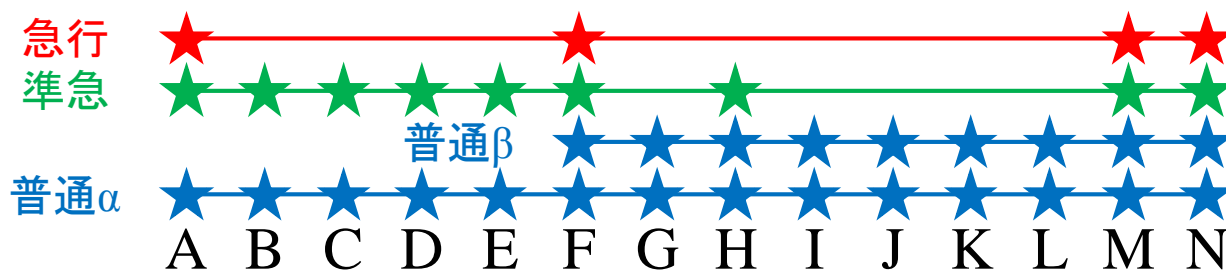


図2.1 モデル路線における各種別の停車駅

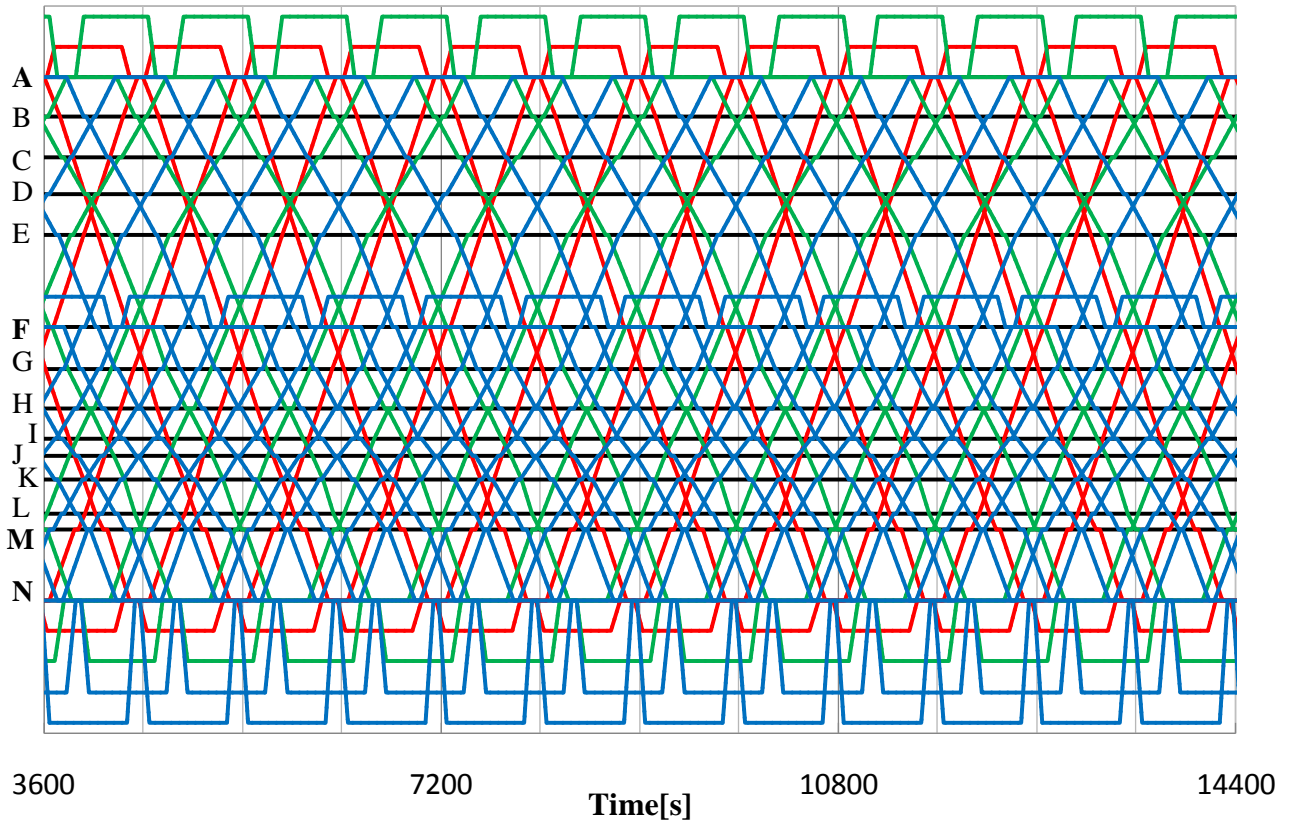


図 2.2 計画ダイヤ

## 2.2 乗客視点でのダイヤ評価

近鉄では、駅構内の遅延時間の合計が最小になる進路制御システムが実用化されている<sup>[10]</sup>。しかしながら、このような考え方で運転整理を考えると、図 2.3 のように運休をすることとなる。ただし、1M・3M・5M・7M は列車番号である。評価値が下がる理由は、運休が 0 分の遅延で評価されるからである。このことで、余計に列車の間隔が開き、運休した列車に乗ろうとしていた客が、ホームにあふれることは考えられる。そのような事態を避けるために、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。ここでは、乗客の感じる損失についての定義を示す。また、乗客流解析の時に、どのように乗客の行動を仮定し、どのように解析・評価を行うのか示す。

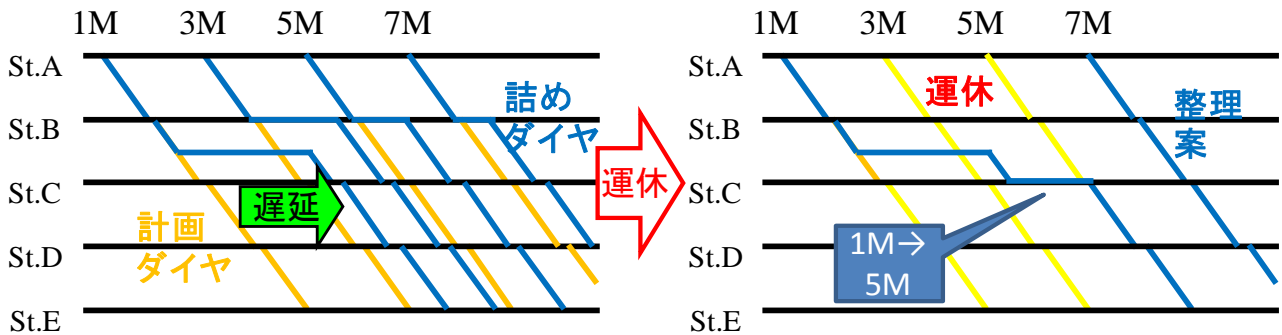


図 2.3 遅延時間の合計が最小となる運転整理例

## 第2章 運転整理システムの概要

乗客総損失の定義は、各損失の線形和で表される。損失の単位は[人・秒]である。 $L$ は乗客総損失、 $L_1$ は所要時間による損失、 $L_2$ は混雑による損失、 $L_3$ はその他の損失を表す。

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (2.1)$$

以降、各損失の定義を示す。

### 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。

$$L_1 = \sum_{i=1}^N t_i \quad (2.2)$$

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。

### 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。

$$L_2 = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=1}^{S_k} f_c \left( \frac{q_{ks}}{c_{ks}} \right) q_{ks} t_{ks} \quad (2.3)$$

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2.4に表す係数<sup>[11]</sup>、 $c_{ks}$ 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。

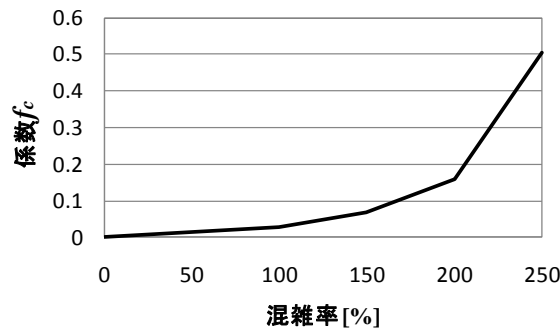


図 2.4 混雑率と係数 $f_c$ の関係

### その他、乗客が感じる損失

ここでは、乗換による損失、列車の待ち時間に感じる損失、駅間走行時間の延長に感じる損失を定義し、これらの損失の総計を $L_3$ とする。

$$L_3 = L_{3a} + L_{3b} + L_{3c} \quad (2.4)$$

#### 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。

$$L_{3a} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} r_{ij} \quad (2.5)$$

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。



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。

$$L_{3b} = w_c \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{S_t} w_{ij} \tag{2.6}$$

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。

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

$$L_{3c} = e_c \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^{S_k} e_{is} \tag{2.7}$$

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。

2.3 運転整理システムの構成

本運転整理支援システムは、先行研究に基づき、列車ダイヤ案を作成し、そのダイヤ案を評価し、評価値が小さいダイヤ案を採用する。列車ダイヤ案を作成する部分では、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、乗客の損失が計算される。運転整理のダイヤの評価値は、運転整理案の乗客総損失から計画ダイヤの乗客総損失を引いたものを使用する。指令員に運転整理案及び乗客総損失もしくは評価値が提示される。それをもとに受け入れるか指令員が判断する。図 2.5 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。

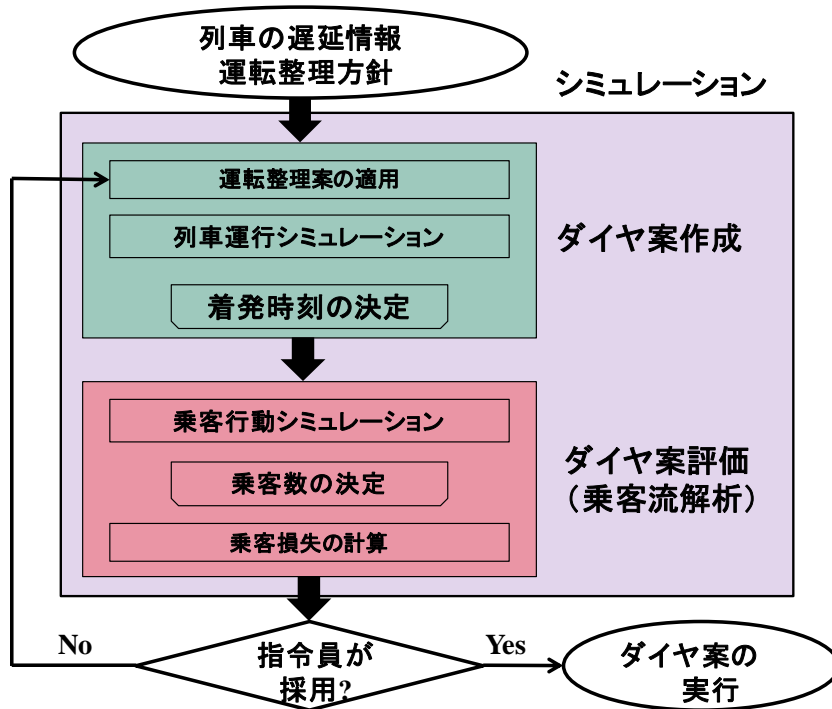


図 2.5 運転整理システムの概要

### 2.4 列車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。ここでは、運行シミュレーションについて紹介する。なお、運転整理については、3章以降で述べる。

#### 2.4.1 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。列車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<sup>[12]</sup>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。

##### 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早着したりしないようにするための制約である。リンクの始端は時刻 0 で、リンクの重みは計画時刻である。

##### 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。

##### 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、その駅に停車しなければならない最小停車時間がある。ただし、列車が通過するとき、リンクの重みは 0 である。

##### 列車運行順序

列車の順序を入れ替えるためには、連動駅もしくは信号所で先行列車を退避するための線路に入れる必要がある。つまり、本線上では列車の順序が入れ替わることはありえない。よって、順序が入れ替わらないよう、同じ本線上を走る列車同士で前の列車から後ろの列車へ、発ノードから発ノード、着ノードから着ノードにリンクを張る。リンクの重みは、最小時隔である。

##### 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。図 2.6 に進路支障の例を示す。

##### 閉塞

鉄道等の専用軌道を走る公共交通においては、前方列車との衝突を避けるために、信号システムを導入している。鉄道線の大部分で導入されているのが、固定閉塞方式である。固定閉塞方式の信号システムでは、閉塞と呼ばれる区間に 1 列車までしか入れないことを原則としている<sup>[13]</sup>。よって、駅間で走れる列車の本数は、閉塞区間の数によって制限される。リンクの始点は、到着ノードであり、ノードの終

第2章 運転整理システムの概要

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。図2.7に固定閉塞方式の信号システムの例を示す。例では、信号現示は、赤、黄、青の3種とし、赤信号手前には速度オーバーでも次の閉塞までに絶対停止する機能があるものとする。

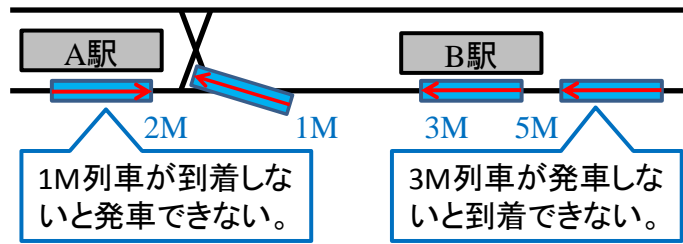


図 2.6 進路支障例

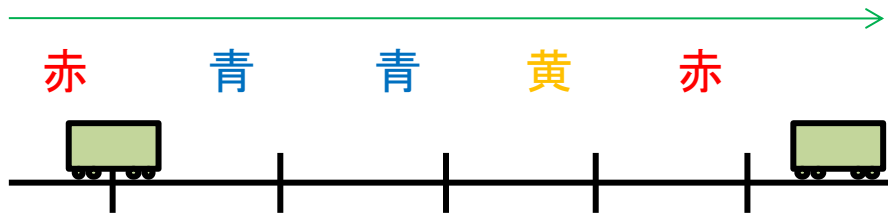


図 2.7 信号システムの例

2.4.2 発着時刻の決定法

時刻の起源となるノードから到着及び発車時刻を表現している各ノードへ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。運転整理を適用する時には適切にノードとリンクの情報を変える必要がある。図2.8に列車運行シミュレーションの例を示す。ノードを○、リンクは、矢印で表している。

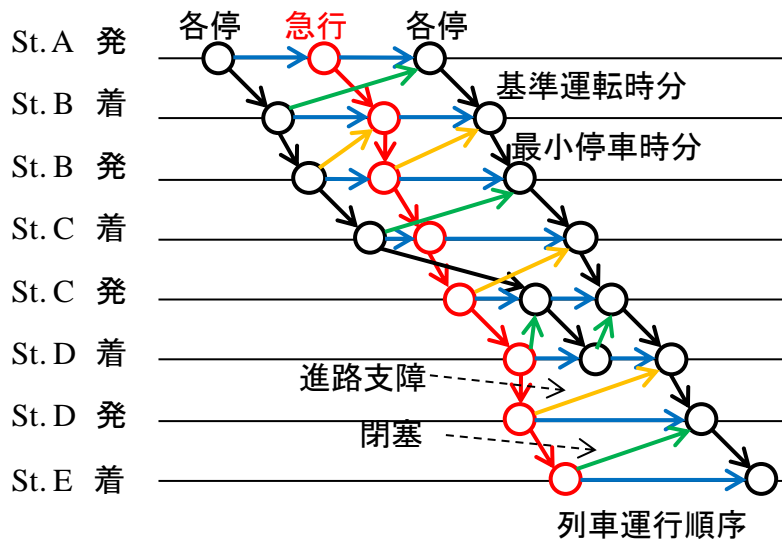


図 2.8 列車運行シミュレーションのノードとリンク

2.4.3 列車遅延時の運行シミュレーション

事故を表現するには、該当列車の事故発生箇所において、計画時刻のリンクを遅れの分だけ足し合わせた重みにすればよい。今回、モデル路線についてN駅発A駅行き上り急行のD駅到着が30分遅れた事故を模擬し、その後、特に運転整理を行わなかった場合のダイヤのシミュレーション結果を図2.9に示す。遅れの個所には、×を記してある。また、点線は計画ダイヤを表している。第3章以降、このケースに各種運転整理を適用していく。

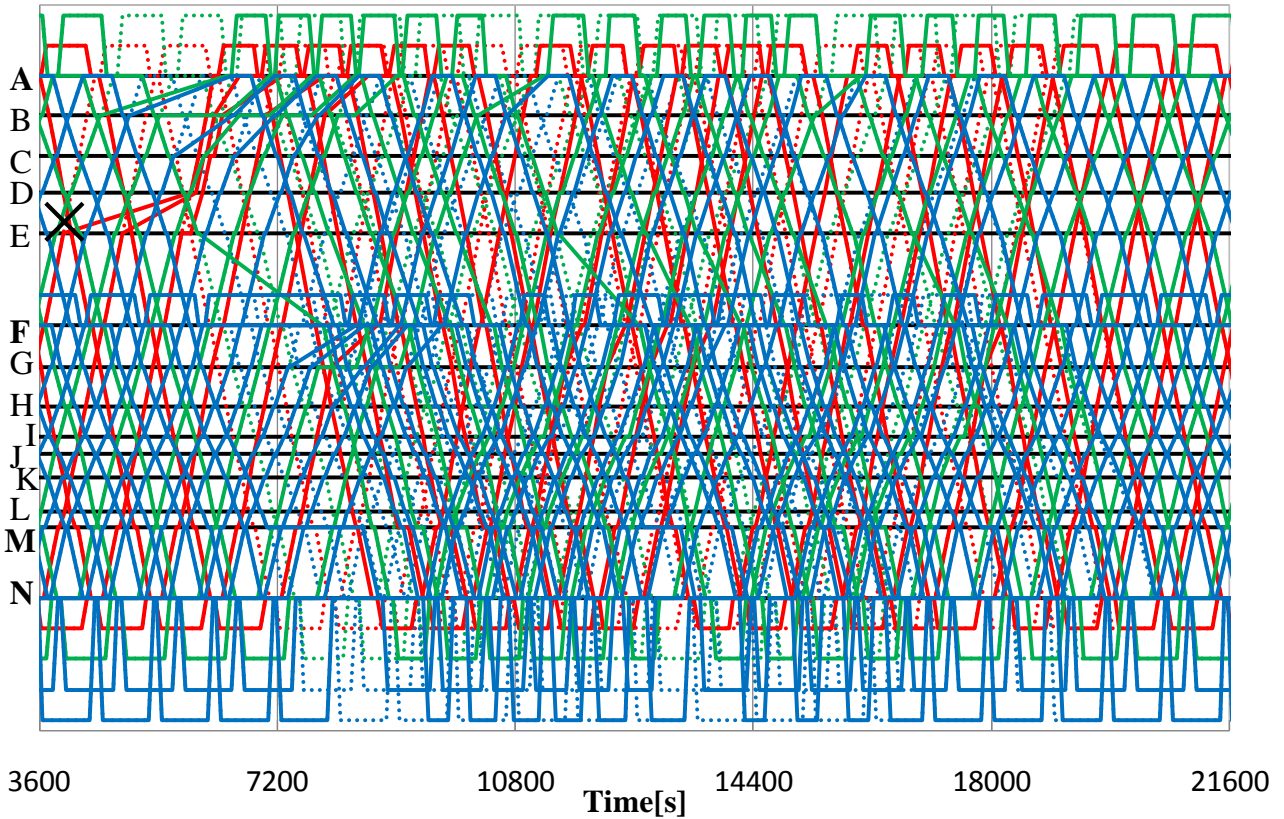


図 2.9 列車遅延発生時のダイヤを模擬した結果

2.5 乗客行動シミュレーション

乗客行動シミュレーションにおいては、各旅客がどの列車に乗るか求める乗客流推定を全旅客について行い、列車に何人乗るかを求める。各列車に何人乗っているかは、混雑の損失を求めるのに使用する。ここでは、乗客流推定の方法、乗客の趣向を考慮した乗客流推定及び因果律を考慮した乗客流推定について述べる。

2.5.1 乗客流のグラフ

各停車ノードから、図 2.10 のように、同じ列車及び乗換元から乗換先へノード間に乗換リンクを張る。乗換リンクは、乗換可能な全列車について実質的にリンクを張る。

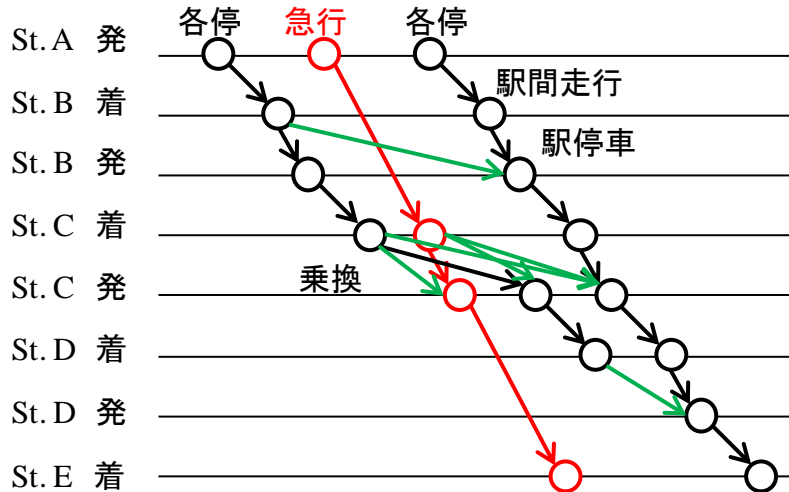


図 2.10 乗客流のグラフ

### 2.5.2 乗客行動の仮定

乗客の行動を推定する為には、乗客の行動を現実に即したモデル、かつ計算時間の問題から簡易なモデルである必要がある。今回、相反するこれらの問題を考慮して、モデルを提案する。

まず、先行研究に基づき、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  $L$  が最小となるように定める。

$$L' = L_1 + L_3 \tag{2.8}$$

混雑は、乗客がどの列車に乗るか検討する段階においては、確定していることではないため、乗客が行動を決定するときその情報は使用できない。よって、混雑による損失を除くことは、合理的であると考えられる。経路探索については、ダイクストラ法を用いている。先行研究においては、損失が最小となる経路を乗客は辿ると仮定している。本論文でも、3章以降は、このように仮定している。

### 2.5.3 乗換を回避する乗客の考慮

2.4.2 において、損失が最小となる経路 1 つのみを仮定した。しかし、その場合、乗換を要することもありうるが、なるべく乗換をしたくないという乗客の趣向に応えることができない。先行研究<sup>[4]</sup>においては、MPS アルゴリズムを用いた複数経路探索が提案されたが、図 2.11 のように、各駅停車を見送って、同じ行き先の後続の各駅停車に乗る経路ができてしまう問題がある。これは、現実に即しているとは言えない。ここで、現実に即す為には、図 2.12 のように、損失が最小となる経路だけでなく、乗換なしという条件のもとで損失が最小の経路 2 つを考えることとした。なお、図 2.12 は、最初の普通が発車した後 A 駅に到着し、D 駅に行きたい乗客が今回のモデルで選択しうる経路を示したものである。

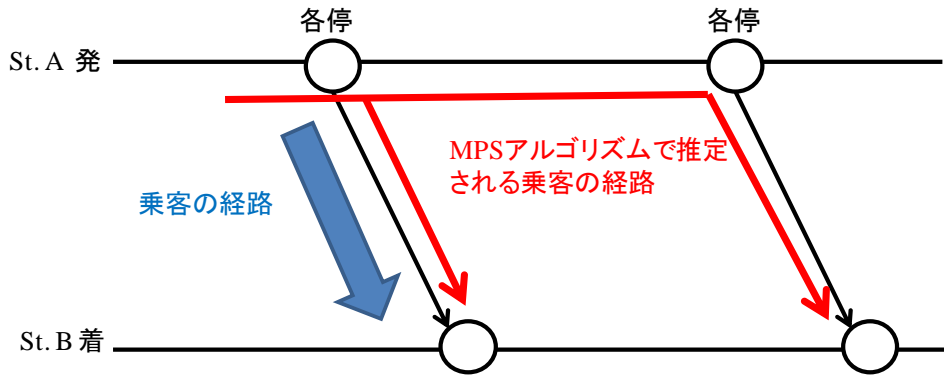


図 2.11 MPS アルゴリズムによる複数経路探索の問題点

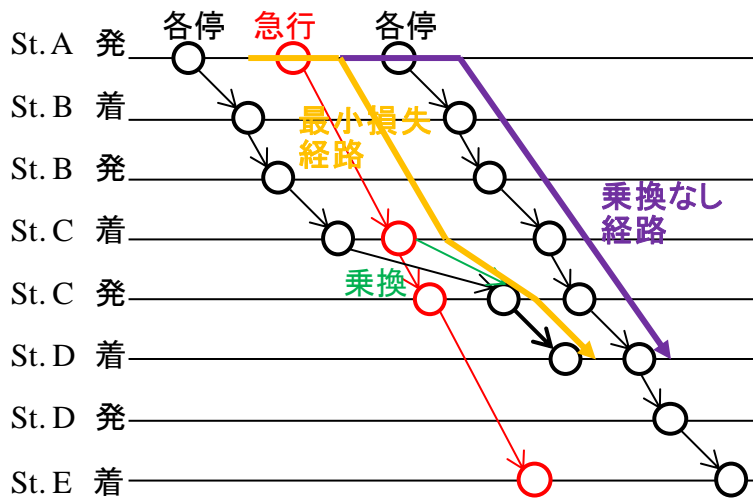


図 2.12 提案する複数経路探索の例

ダイヤによっては、2つの経路は一致することもあるが、2つの経路が異なるとき乗客を適切な配分で振り分ける必要がある。その振り分けには、式(2.9)及び式(2.10)に表す非集計ロジットモデルを用いる。

$$P_A = \frac{e^{-\theta L_A}}{e^{-\theta L_A} + e^{-\theta L_B}} P \quad (2.9)$$

$$P_B = \frac{e^{-\theta L_B}}{e^{-\theta L_A} + e^{-\theta L_B}} P = P - P_A \quad (2.10)$$

ただし、 $P$  はある出発駅からある到着駅までの利用しようとしている人数、 $P_A$  は1つ目の経路に振り分ける人数、 $P_B$  は2つ目の経路に振り分ける人数、 $\theta$  はロジットモデルの定数、 $L_A$  と  $L_B$  はそれぞれの損失とする。

今回、図 2.2 示した計画ダイヤにおいて、(1) ダイクストラ法による最小損失経路探索のみのものと、(2) 乗換なし経路探索のみ (3) 今回の提案手法の3つの手法で乗客総損失を比較する。図 2.13 において結果を示す。なお、結果は、1 サイクル(15分)分である。また、図 2.14 には、F 駅から G 駅の列車種別毎の乗車人員割合を示す。ただし普通  $\alpha$  は全線通し運行、普通  $\beta$  は図 2.15 において中の方 F 駅から下の方の N 駅までの区間運行である。なお、待ち時間不効用  $w_c$  を 0.6、乗換不効用を 5 秒とした<sup>[15]</sup>。また、ロジットモデルの定数  $1/300[1/s]$  という条件<sup>[9]</sup>で行った。

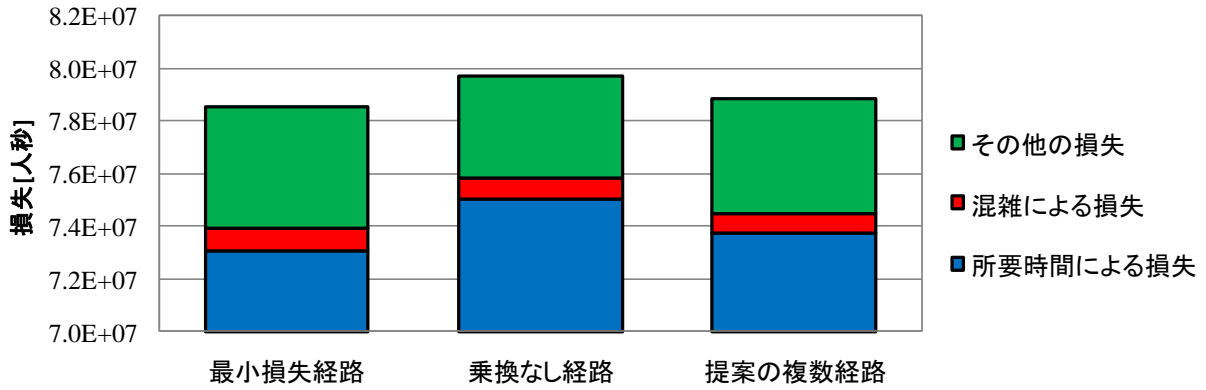


図 2.13 各種経路による損失

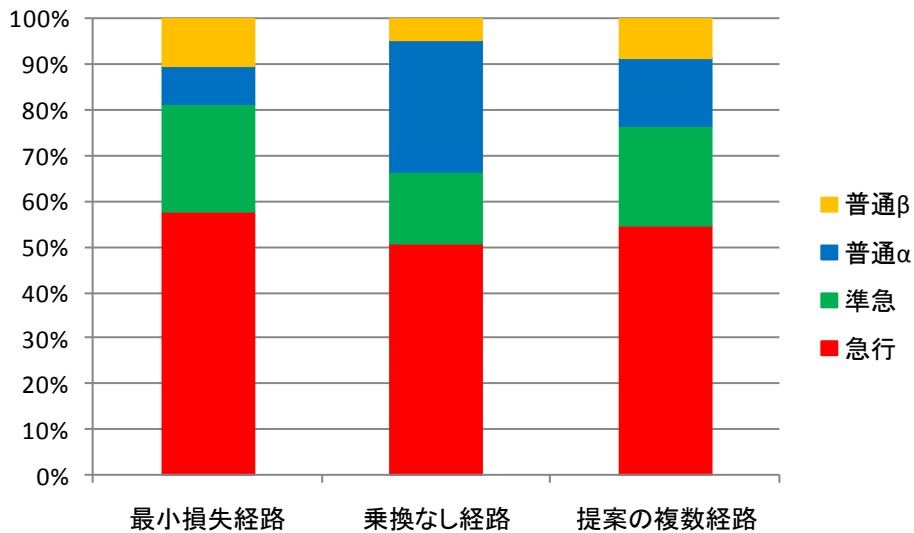


図 2.14 乗車人員の割合 (下り F 駅~G 駅)

今回の結果は、所要時間による損失と駅での待ち時間による損失が主なその他の損失においては、最短損失経路探索が小さく、乗換なし経路探索は大きくなった。これは、乗換なし経路においては、駅で待つ時間が長い傾向にあるためと考えられる。

提案手法は、最小損失経路と乗換なし経路、どちらに偏ることなく、2つの乗車趣向を適切に分離し評価できていることが確認できた。また、その差はわずかとはいえ混雑損失が最も小さかった。これについて考察する。図 2.9 及び式(2.3)から、混雑率が列車間の差が小さいほど、混雑損失は小さくなる。図 2.10 を見ると、普通αと普通βの乗車人員の割合が、最小損失経路探索では普通βに、乗換なし経路探索では普通αに集中しているが、提案モデルでは2つの普通はほぼ一緒の乗車人員である。よって、1つの乗客趣向の仮定では利用される列車が偏って計算されざるをえなく、混雑損失が高い結果になった。それに対して、複数の乗客趣向を考慮することで利用される列車偏りが解消され、混雑損失が小さくなったと考えられる。

## 第2章 運転整理システムの概要

乗客流解析は、運転整理案が生成されるたびに行われるため、その計算時間はシステム全体の計算時間に大きく影響を与える。よって、提案した手法が著しく計算時間がかかるものであるか確認する必要がある。先行研究ではMPS アルゴリズムによるk個の経路を探索することが提案されている。この時の計算時間の結果と図2.15で比較する。計算規模が異なるため単純な比較はできないが、MPS アルゴリズムで2つの経路を探索する計算時間と、今回提案した手法での計算時間は同じ傾向であり、提案手法が理不尽なほど計算に時間がかかるものではなく、適切な時間で計算できていることを示している。

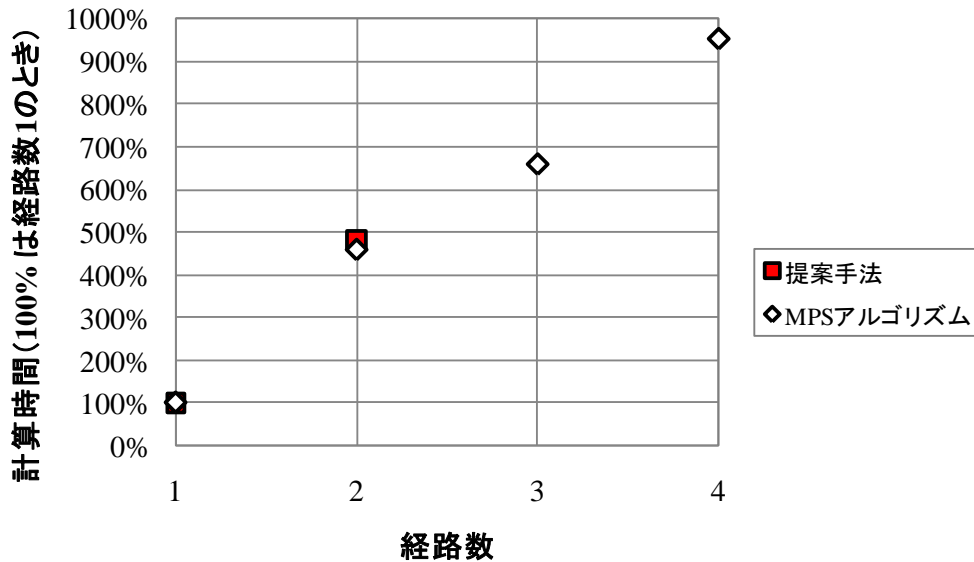


図 2.15 提案手法と MPS アルゴリズムでの計算時間

乗換を回避する乗客を考慮したときの問題は、列車遅延が発生したときに、乗客がその趣向を維持し続けるかどうか分からないことにある。よって、2.4.4 で述べる因果律の問題を考慮したとしても、運転整理時の乗客流解析は今のところ不可能である。よって、以降、本論文での乗客流解析では、従来通り、それぞれの乗客は、損失が最小の経路を辿るものとする。

### 2.5.4 因果律を考慮した乗客流推定

本システムは、支障や事故が起こったときの状態をシミュレーションできる必要がある。先行研究<sup>[7]</sup>より、支障・事故時のダイヤをそのまま乗客流推定を行うと図2.16のA駅からE駅の乗客流解析のように将来の事象を予測したような行動をとる。よって、そのようなことのないように、支障・事故発生時の乗客の状況別にどのような行動がとりうるか考える必要がある。以下で、状況別でどのように乗客流推定を行うか述べる。なお、ここでは、最短損失経路をダイクストラ法によって乗客流推定を行う。また、支障・事故発生後の5秒後には全乗客がその後のダイヤ案を把握し、そのダイヤ案を基に行動できるものとする。



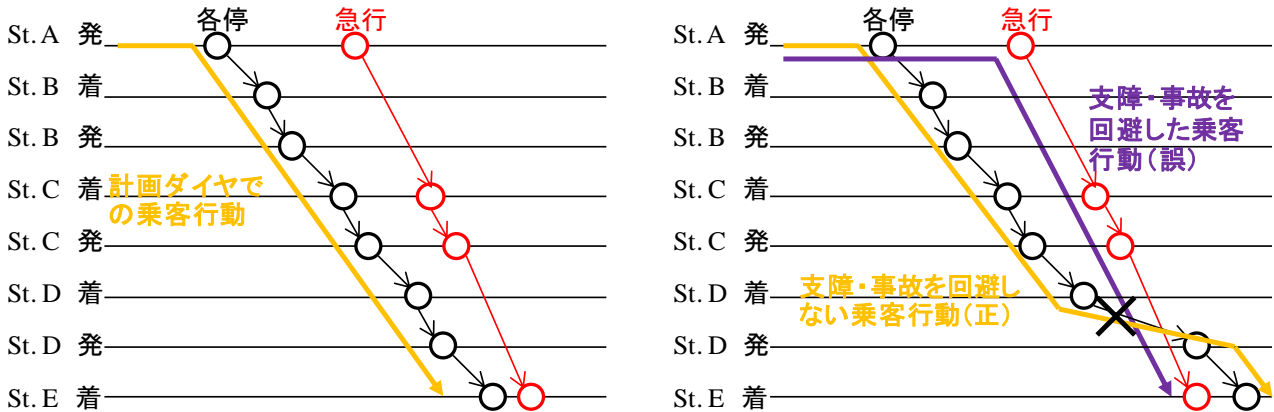


図 2.16 支障・事故を回避した乗客行動

①乗客が事故前に出現し、目的駅に着いてから支障・事故が発生

支障・事故の発生したダイヤか計画ダイヤのどちらかで乗客流推定を行う。

②乗客が事故前に出現し、目的駅に着く前に支障・事故が発生

このとき、まず、計画ダイヤにおいて乗客流推定を行う。この結果から事故発生時に走行列車内にいるか駅にいるかで、さらに分類する必要がある。

(i)事故発生時に走行列車内にいるとき

次の停車駅までは、乗客はその列車に乗っているものとして、乗客流推定を行う。その後の行動の推定だが、支障・事故の発生したダイヤにおいて、次の駅の着ノードより目的駅の着ノードまで乗客流推定を行う。

(ii)事故発生時に途中駅にいるとき

支障・事故の発生したダイヤにおいて、その駅まで乗ってきた列車の着ノードより目的駅の着ノードまで乗客流推定を行う。ただし、そのとき、事故発生前にその駅を出る列車には乗れないようにする。

(iii)事故発生時に出発駅にいるとき

支障・事故の発生したダイヤにおいて、出発駅の発ノードより目的駅の着ノードまで乗客流推定を行う。ただし、そのとき、事故発生前にその駅を出る列車には乗れないようにする。

③乗客が事故発生後に出発駅に出現

支障・事故の発生したダイヤで乗客流推定を行う。

### 2.6 大規模乱れ時の折り返しを考慮した上下両方向の運転整理

大規模乱れ時においては、列車の走行時間にある余裕や停車時間や折り返し時間にある余裕があったとしても、遅れている列車の折り返しの列車も遅れる。また、そのさらに折り返しの列車も遅れてしまい、図 2.9 のように遅れの連鎖が発生してしまう。このとき、片方向のみを考慮して運転整理を行ったとき、反対側の列車のダイヤを乱し、余計に乗客に迷惑を掛けることも考えられる。よって、列車の運行及び運転整理について上下両方向で考える必要がある。特に、下りと上りを繋ぐ、折り返しについて考慮する必要がある。一般的に、折り返しは、乗務員が端から端まで移動しなければならないといった理由で、10分～15分程度時間がかかってしまう。また、引上線や折り返せる番線等の設備がある駅は少なく、非常に限られた設備である。折り返しのところでは、1箇所での列車の停車時間が長い、つまり、そこで列車が詰まり易いことを意味している。第3章及び第4章では、反対側の列車の運行も考慮し、また、折り返しのところで詰まることを考慮した運転整理手法について提案する。

## 第3章

### 抑止と乗客流を考慮した時隔調整

本章では、上下両方向における大規模乱れ時の抑止及び乗客流を考慮した時隔調整法を提案し、その有用性を示す。

#### 3.1 抑止と時隔調整

あるところで支障・事故が発生したにも関わらず、各列車の運転を続けると、支障・事故箇所が詰まってしまい、長時間駅間に停車してしまう原因となる。駅間に長時間停車すると、旅客が閉じ込められることとなり、例えば、トイレがない車両では我慢しなければならず、相当な苦痛を与えるものである。また、駅ならば、他の鉄道線やバス・タクシーを使って目的地へ行くこともできる。よって、手前の駅で列車を止める必要がある。この列車を止めることを抑止という。図 3.1 に抑止の概要を示す。実用例として、JR 東日本の運行管理システム ATOS では、通知運転という取り扱いを行えるようにしている。通知運転では、前の駅の進路が開通するまで前の駅で抑止する。そのことで、駅間の停車を防いでいる<sup>[16]</sup>。その概要を図 3.2 に示す。なお、1M、3M、5M は列車番号である。

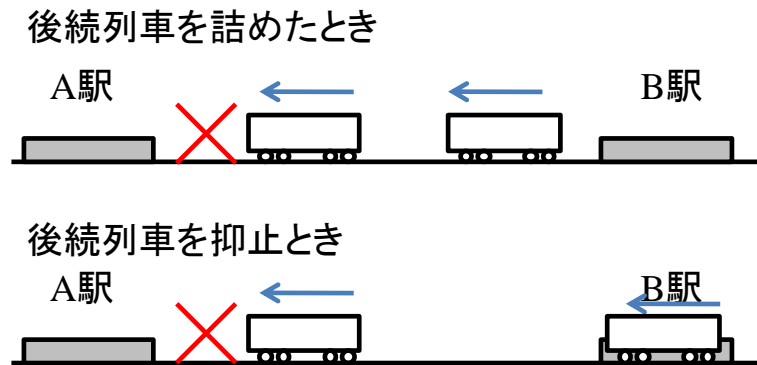


図 3.1 抑止

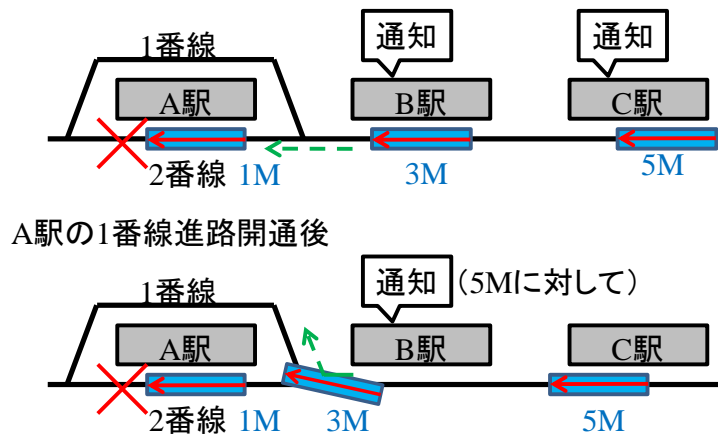


図 3.2 通知運転

### 第3章 抑止と乗客流を考慮した時隔調整

また、後続列車が何かしらの理由で遅延したときに、そのまま先行列車が運転を続けると、後続列車に遅れている分の乗客が増加する。このことは、混雑の偏在、後続列車乗客の目的地までの所要時間増大が起こる。また、混雑により、停車時間が増大しさらに遅延が発生することもありうる。このような事を防いだり、緩和したりするために、先行列車を遅らせ列車間隔の調整を行う。これを時隔調整、延発、間隔調整などといい、事業者によって名称は異なる。本論文では、時隔調整とする。時隔調整について、図 3.3 にイメージを示す。実用例として、東京メトロの運行管理システムでは、遅延列車と前後数本の列車間隔を等しくなるように調整時間を計算し、駅の表示機に表示する。表示に従って運行することで、時隔調整（東京メトロでは間隔調整という）を行う<sup>[17]</sup>。また、先行研究<sup>[7]</sup>においては、片方向で乗客流を考慮した時隔調整法が提案されており、本論文では第3章で両方向に拡張する。

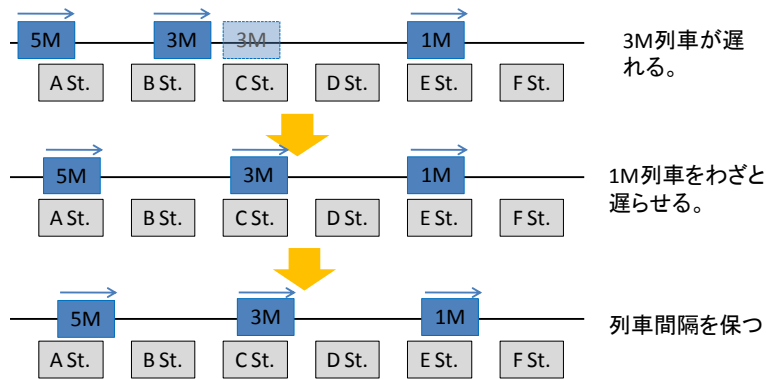


図 3.3 時隔調整

### 3.2 本システムにおける抑止のアルゴリズム

3.1 章で述べたように、抑止の目的は、駅間停車を防ぐことにある。その目的から、通過駅でなく、なるべく停車駅で抑止することが望ましい。なぜならば、通過駅の場合、扉を開けることができない、また、開けられるように準備する必要があるからである。よって、本システムにおいては、停車駅で抑止することを基本とする。また、その条件をなるべく満たしつつ、各列車の運転については、なるべく運行できるところまで運行するものとする。これは、列車間隔が支障・事故箇所の前後で不均衡になるが、その解消は 3.3 章で述べる時隔調整で解決するものとする。

アルゴリズムのフローチャートについて図 3.4 に示す。ケーススタディーに適用した結果については、3.4 章に示す。

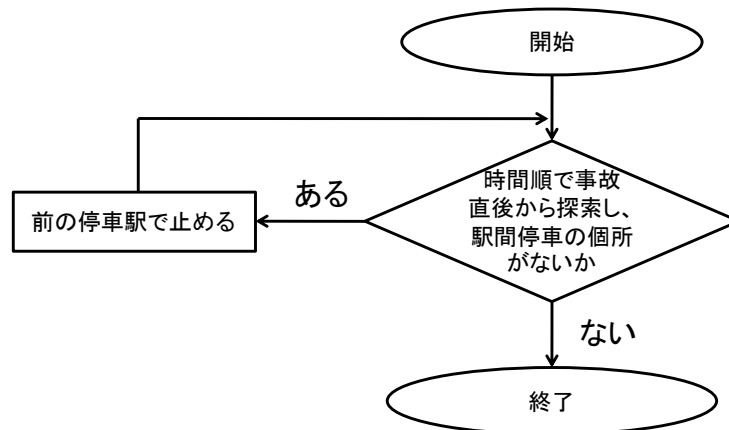


図 3.4 抑止のアルゴリズム

### 3.3 乗客流を考慮した時隔調整

#### 3.3.1 乗客流を考慮する必要性

ここでは、時隔調整に乗客流を考慮する必要性を述べる。既に乗車している乗客にとって、時隔調整のための停車は、所要時間損失を含む乗客損失の増大を招くが、調整中に駅についた乗客にとっては逆に減少となりうる。もし、車内に残る客に比べて、乗降客が少なければ、損する人が多く、ダイヤの質を損なう恐れがある。原氏等は、高速化かつ妥当な結果を出す、乗客流を考慮した時隔調整法を提案しており<sup>[18]</sup>、これにより、この問題は解決できる。しかし、対応しているのが、片方向の運行のみであることが述べられており、両方向への適用が課題である。

#### 3.3.2 原の先行研究

ここで、原が提案した方法<sup>[18]</sup>について述べる。ダイヤ全体の乗客損失の増加は、式(3.1)のようになる。

$$\begin{aligned}
 F = & \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N p_{jk} x^2 \\
 & + \left[ \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N \{p_{jk}(t_{1j} - t_{2j} + t_{\alpha jk} - t_{\beta jk} - 2\tau_{1j} - \tau_{jk}) + R_{jk}\} \right. \\
 & \left. + \sum_{k=I+1}^N P_k \right] x \\
 & + \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N \{p_{jk}\tau_{1j}(-t_{\alpha jk} + t_{\beta jk} + \tau_{jk} + \tau_{1j} - t_{1j} + t_{2j}) - R_{jk}\tau_{1k}\} \\
 & - \sum_{k=I+1}^N P_k \tau_{1k}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

ただし、 $I$ は調整実施駅、 $P_V$ は $V$ 駅で下車した乗車人員、 $p_{ij}$ は $i$ 駅か $j$ 駅を乗換せずに利用する単位時間当たりの乗車人員、 $R_{jk}$ は $j$ 駅から乗換で乗車し、 $k$ 駅で降車する乗車人員、 $t_{1j}$ は、前の列車との間隔、 $t_{2j}$ は後続列車との間隔、 $t_{\alpha jk}$ は実施列車に $j$ 駅から乗車したときの $j$ 駅までの所要時間、 $t_{\beta jk}$ は、後続列車に $j$ 駅から乗車したときの $j$ 駅までの所要時間、 $x$ 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。 $\tau_{1k}$ は、 $k$ 駅までの余裕時分である。これより、調整時間 $x$ は、増加損失 $F$ を最小とすればよいので、式(3.2)のようになる。

$$x = - \frac{\sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N \{p_{jk}(t_{1j} - t_{2j} + t_{\alpha jk} - t_{\beta jk} - 2\tau_{1j} - \tau_{jk}) + R_{jk}\} + \sum_{k=I+1}^N P_k}{2 \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N p_{jk}} \tag{3.2}$$

ただし、 $x$ が負になったときは0とし、 $x$ が正のときはダイヤに合うように値を例えば5秒単位で丸める。また、時隔調整の適用順序を図3.5に示す<sup>[7]</sup>。

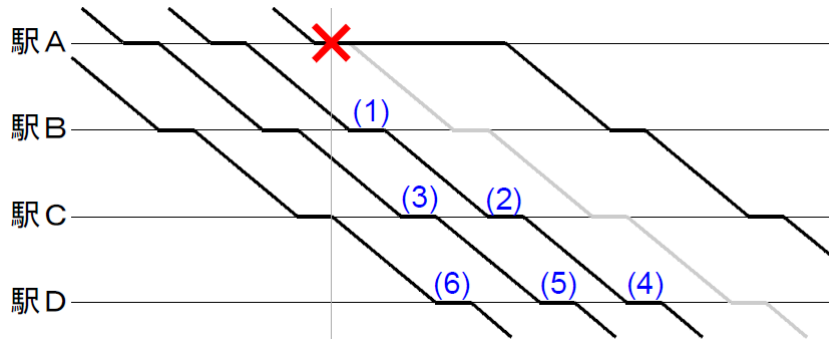


図 3.5 時隔調整実施箇所と順序<sup>[7]</sup>

### 3.3.3 本システムのアプローチ

本システムにおいては、待ち時間に感じる損失を考慮しているため、新たに損失の増減について、乗客の行動別に求める。

①時隔調整前のダイヤにおいて  $V$  駅で下車予定だった乗客の損失  $F_1$

$$F_1 = (1 + w_c) \sum_{V=I+1}^T P_V \left( x - \sum_{a=I+1}^{V-1} \tau_a \right) \quad (3.3)$$

②時隔調整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の損失  $F_2$

$$F_2 = (1 + w_c) \sum_{U=I}^{T-1} \sum_{V=U+1}^T p_{UV} \left( x - \sum_{a=I+1}^U \tau_a \right) \left( x - \sum_{a=I+1}^{V-1} \tau_a \right) - \sum_{U=I}^{T-1} \sum_{V=U+1}^T p_{UV} H_{UV} \left( x - \sum_{a=I+1}^U \tau_a \right) \quad (3.4)$$

③時隔調整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の損失  $F_3$

$$F_3 = - \sum_{U=I}^{T-1} \sum_{V=U+1}^T q_{UV} H_{UV} \left( x - \sum_{a=I+1}^U \tau_a \right) \quad (3.5)$$

④時隔調整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の損失  $F_4$

$$F_4 = - \sum_{U=I}^{T-1} \sum_{V=T+1}^Z (p_{UV} + q_{UV}) H_{UV} \left( x - \sum_{a=I+1}^U \tau_a \right) \quad (3.6)$$

これらの合計が評価値の増加分  $F$  とすると、

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (3.7)$$

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。 $\tau_a$  は、 $a$  駅での停車余裕時分である。この式では、時隔調整で乗換列車が変化することについて

### 第3章 抑止と乗客流を考慮した時隔調整

は考慮していない。また、原の方法と異なり、仮定として時隔調整によって、列車の駅間走行時分は変化しないものとする。つまり、列車の駅間走行時分が変わらないように時隔調整という運転整理を行う。ここで、原の式との文字関係を式(3.8)・式(3.9)に示す。ただし、この2式のみ待ち時間に感じる損失の係数  $w_c$  は0とする。

$$P_V = \sum_{j=1}^{N-1} \{p_{jk}t_{1j} + R_{jk}\} + P_k \quad (3.8)$$

$$H_{UV} = t_{2j} - t_{\alpha jk} + t_{\beta jk} \quad (3.9)$$

停車余裕時分であるが、3.3.4 で理由を述べるが、停車余裕時分も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駅で時隔調整の計算区間を区切る。停車余裕時分があると期待される具体的な駅は、最小停車時分より長い停車を行っている駅もしくは折り返す駅である。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(3.7)が最小となればよいので、式(3.10)のようになる。

$$x = \frac{-(1 + w_c) \sum_{V=I+1}^T P_V + \sum_{U=I}^{T-1} \sum_{V=U+1}^T (p_{UV} + q_{UV}) H_{UV}}{2(1 + w_c) \sum_{U=I}^{T-1} \sum_{V=I+1}^T p_{UV}} \quad (3.10)$$

$x$  は、5秒単位で丸めるものとする。式(3.10)より始発駅や乗客が入れ替わる駅、もともと列車に乗っている人に対して乗車する乗客の多い駅で時隔調整を行うのが効果的であると言える。

アルゴリズムについては、図3.6に示す。また、ケーススタディーによる適用結果は3.4章に示す。

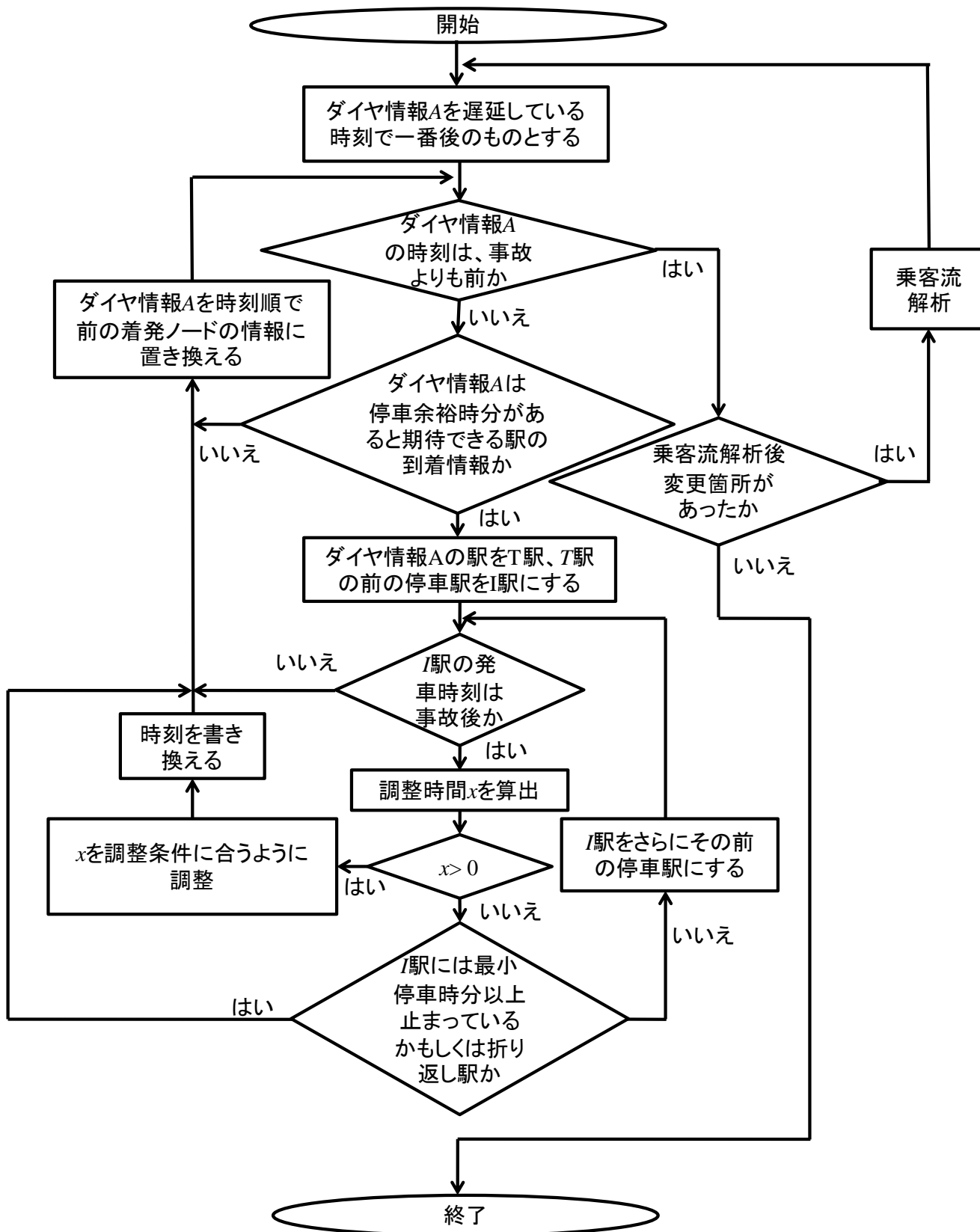


図 3.6 時隔調整のアルゴリズム



#### 3.3.4 本時隔調整アルゴリズムの特長

本時隔調整のアルゴリズムの特長としては、大規模乱れ時も上下両方向で調整時間を効率よく導けることにある。それは、以下の2つの工夫によるものである。

- ①余裕時分を算出式の中に入れて計算する。
- ②時刻順とは逆から計算する。

まず、①について、どういう考え方に基づいたか説明する。時隔調整を行い、その後、列車運行シミュレーションを行うと、余裕時分の分速くなる。よって、乗客の損失の増減を計算するのに、この数値を入れ込まなければならない。しかし、そのためには、余裕時分を求める必要がある。その為には、時隔調整前のダイヤの走行時分や停車時分から、基準運転時分や最小停車時分を引けば求まるようにも思えるが、他の列車との進路競合等による無駄時間と区別できない。特に、2章の図2.7にあるように、列車の詰まりやすい折り返し部分ではそれは特に顕著である。余裕時分は、列車運行シミュレーションを行うことで求める事ができる。しかし、調整時間を算出する度に列車運行シミュレーションを行うのは非効率的である。また、さらに問題なのは、余裕時分をどの区間まで計算し、算出式に入れ込めばよいかという点である。ダイヤが定時に戻ったときには、余裕時分を使って速く走ることはしてはいけない。よって、ダイヤが定時に戻っている区間の余裕時分は算出式に入れてはいけない。しかし、算出式から出される調整時間によって、どのタイミングで定時に戻るかわかってしまう。そのため、調整時間を出すたびに、余裕時分を算出式に入れ込む区間が適切であったか検討し、ダイヤがもとに戻るところまでの全ての余裕時分を入れ込み、かつその後の区間の余裕時分を入れ込んでいない状態になれば、再度計算し直す必要がある。よって、1箇所の調整時間を求めるだけで繰り返し計算が必要になり、非効率的である。そのため、余裕時分を算出式から取り除くべく、次のような工夫を行った。

- I. 調整時間算出時の対象列車において走行時間の短縮は行わないと仮定する。
- II. 停車余裕時分があると期待される駅である、最小停車時分より長く停車している駅や折り返し駅を跨いだ区間で算出を行わない。また、跨いでしまうような調整時間が出たときは、跨がないような値まで小さくする。

次に、②について、どういう考え方に基づいたか説明する。事故直後は、列車の遅れが大きいので、調整時間は大きくなる。そして、時刻が進めば遅れがだんだん収束し、調整時間は小さくなっていくと考えている。①IIを行うと、先の区間でまだ時隔調整をしていないことから、その分調整時間の範囲が小さくなってしまう。逆に、先の区間で先に時隔調整が行われていれば、その分、時隔調整できる調整時間の範囲は大きくなる。また、式(3.10)より、時隔調整を前から行うと、次の調整箇所の $P_V$ の値を乗客行動シミュレーションで求める必要がある。後から行うと、 $H_{UV}$ を乗客流推定で求めればよいだけである。乗客行動シミュレーションは、出発駅から目的駅までの損失を求め、乗客が乗る経路を求め、そこに乗客を割りつける必要がある。しかし、ここで行う乗客流推定は、出発駅Uから目的駅Vの損失を求めるだけでよい。これらの要因により、速く時隔調整のアルゴリズムの計算を終えることが期待できる。

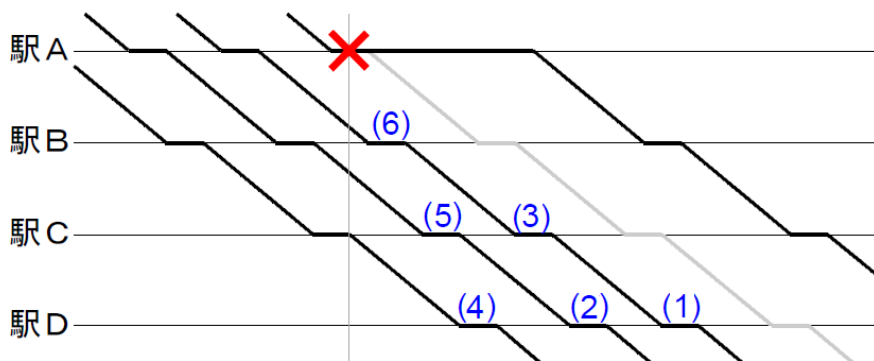


図 3.7 本アルゴリズムでの時隔調整の順番

### 3.4 抑止及び乗客流を考慮した時隔調整の適用効果

#### 3.4.1 抑止の結果

まず、抑止について結果を示す。2章で示したケーススタディーについて抑止のアルゴリズムを適用したものを図 3.8 に示す。

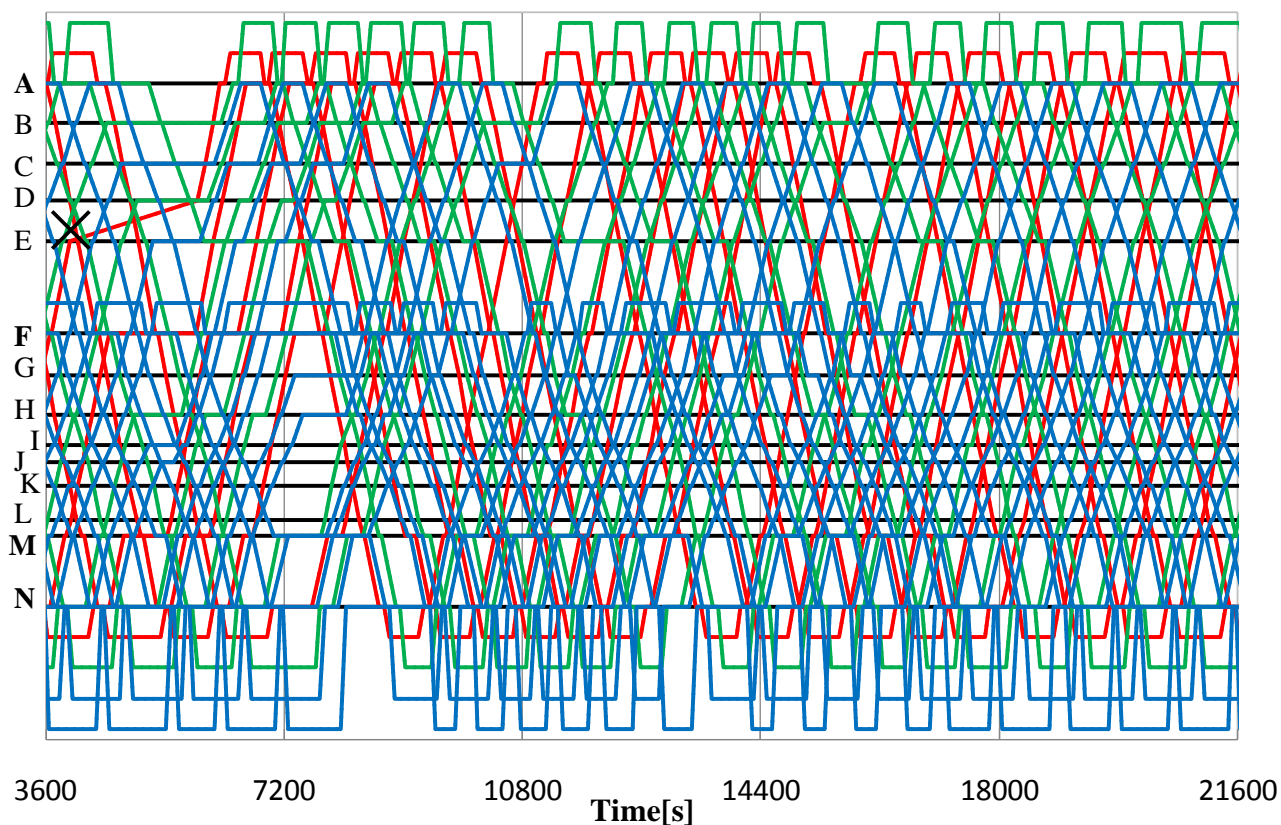


図 3.8 抑止ダイヤ

### 3.4.2 時隔調整の結果

今回、抑止アルゴリズム適用後に、時隔調整のアルゴリズムを適用するときに、調整時間  $x$  の値の変域による結果の違いをシミュレーションした。

$\alpha$  …非負である。

$\beta$  … $\alpha$ に加え、調整列車の  $T$  駅以降及び他の列車が停車駅の到着で余計に遅れないよう調整する。

$\gamma$  … $\alpha$ に加え、構内作業を含む他列車のダイヤに遅れが余計に遅れないように調整する。

ルール $\alpha$ 、ルール $\beta$ 、ルール $\gamma$ 適用のダイヤと詰めダイヤの比較のために、各ダイヤの評価値を図3.9に示す。ただし、今回、ダイヤの評価に使った定数は、駅間走行時分の延長不効用係数  $e_c$  を1、待ち時間不効用係数  $w_c$  を  $0.2^{[19]}$ 、乗換不効用を急行とその他の種別間を120秒<sup>[20]</sup>、その他の組み合わせを5秒<sup>[19]</sup>とした。また、ルール $\alpha$ とルール $\beta$ とルール $\gamma$ 適用のダイヤを図3.10と図3.11と図3.12に示す。

また、各ルールについて、整理案の乗客総損失から計画ダイヤの乗客総損失を引いた評価値と列車間隔を調整するために繰り返した乗客流解析の回数との関係を図3.13に示す。図3.9の結果より評価値が一番小さいことから、ルール $\beta$ が良いことがわかる。よって、このルールを以降採用する。図3.14に抑止のアルゴリズム及び時隔調整においてルール $\beta$ を段階的に適用したときの評価値及び評価値の内訳を示す。

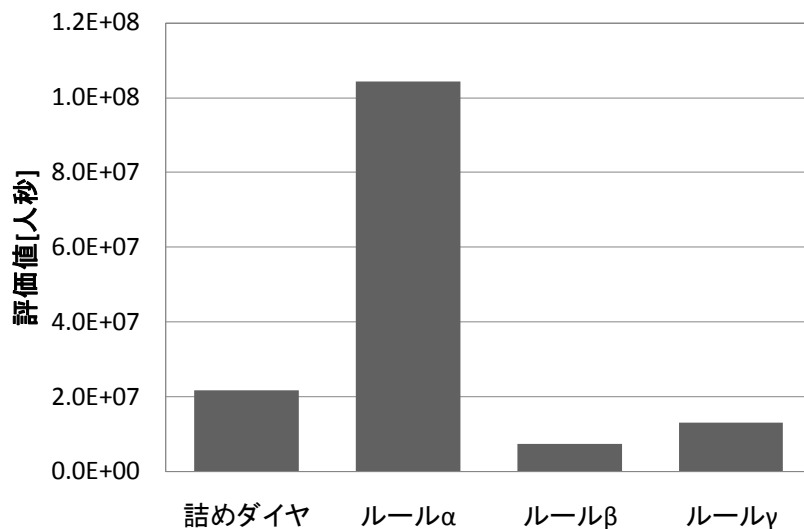


図 3.9 評価値の比較

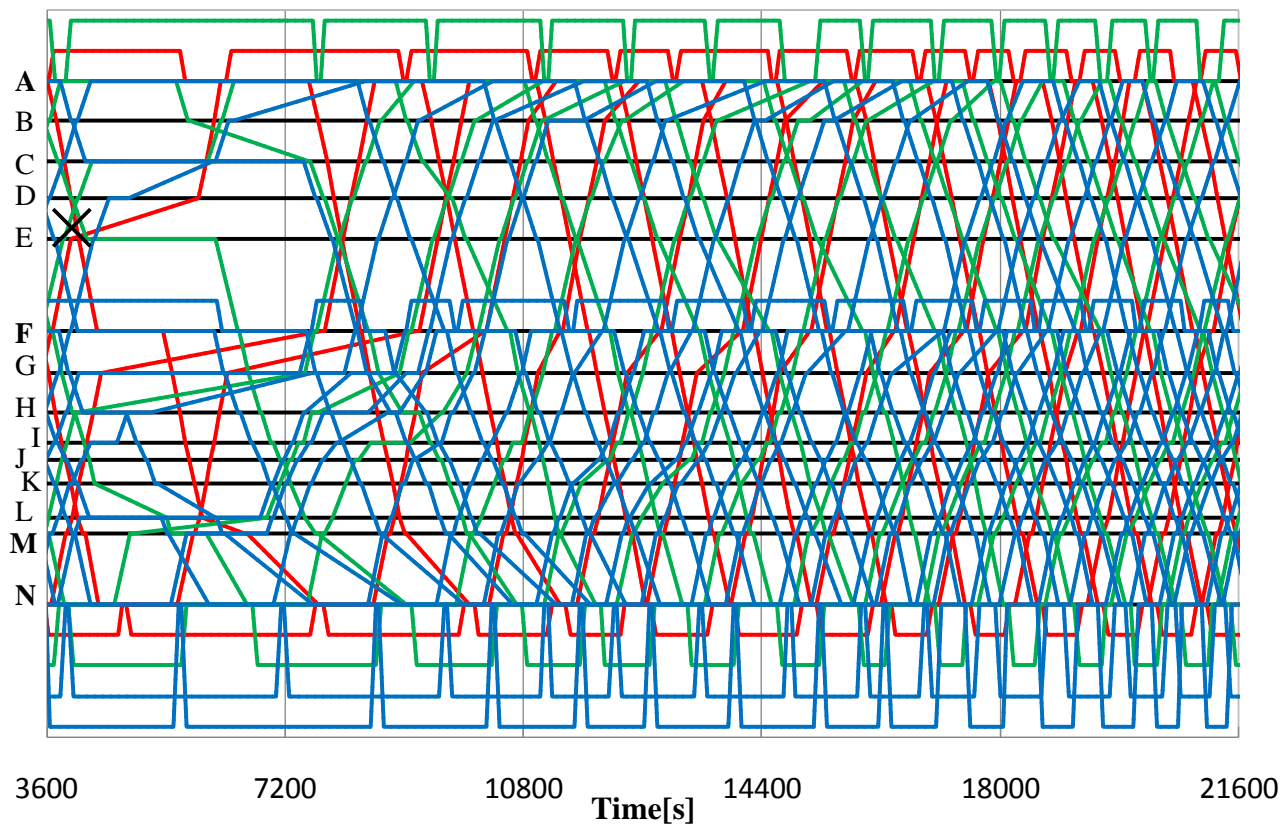


図 3.10 ルール  $\alpha$  適用時の時隔調整

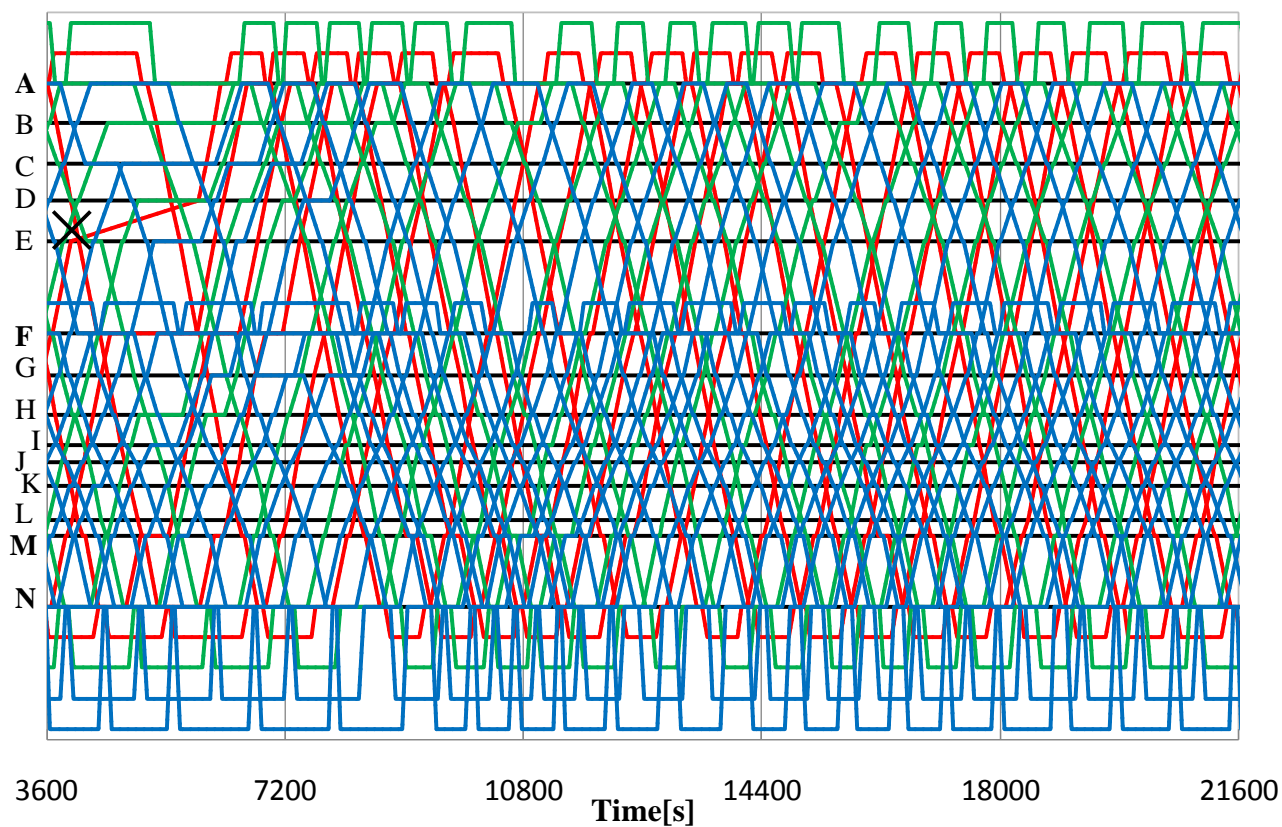


図 3.11 ルール  $\beta$  適用時の時隔調整

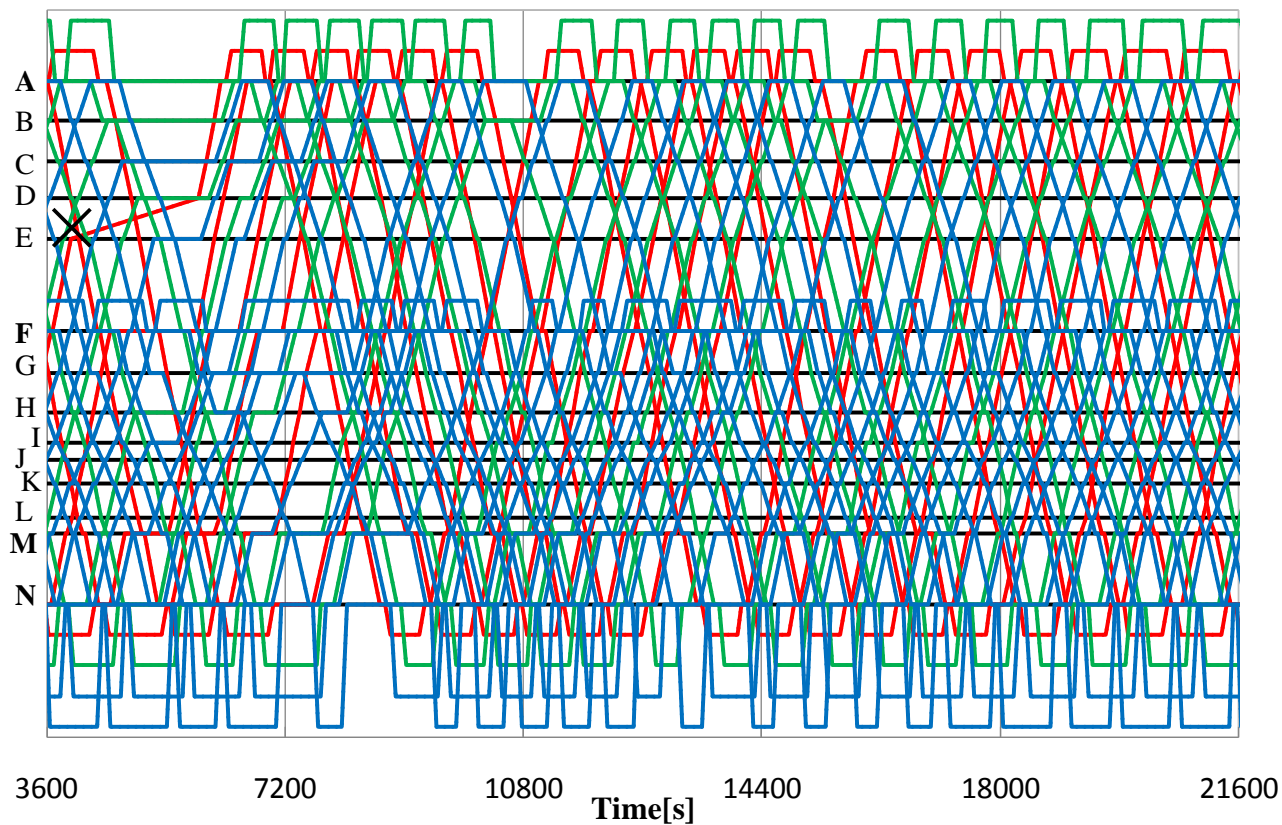


図 3.12 ルール  $\gamma$  適用時の時隔調整

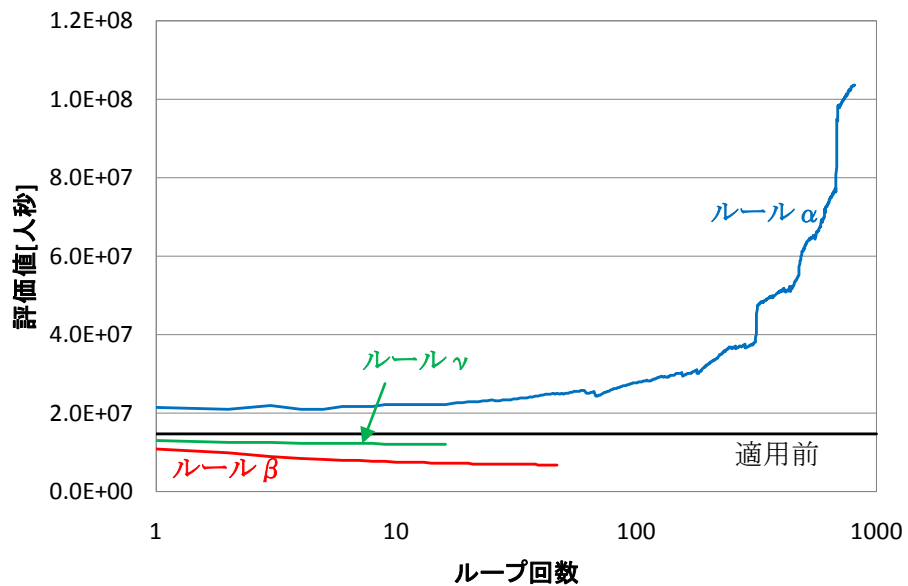


図 3.13 乗客流解析の回数と評価値の推移

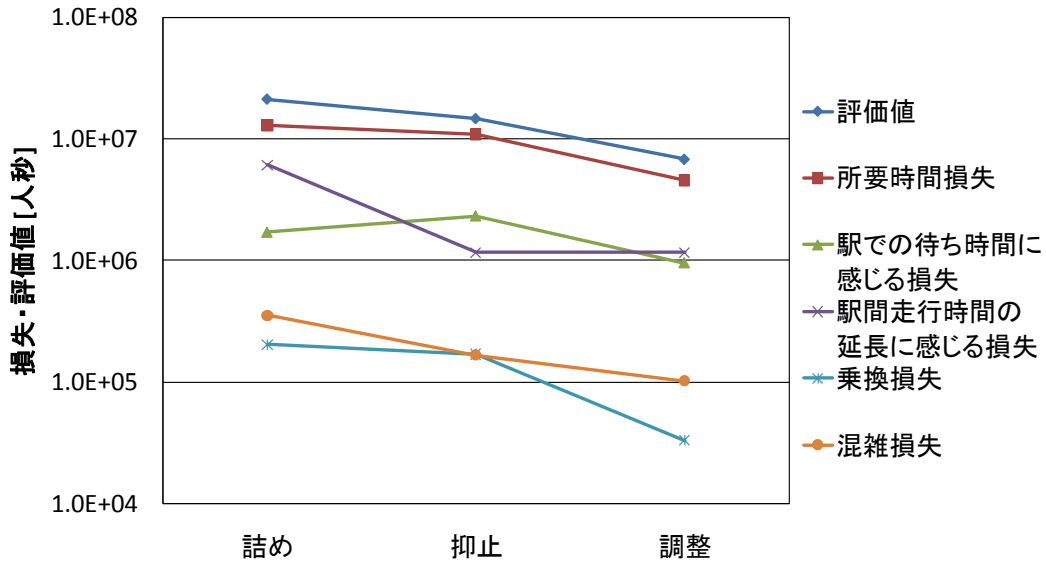


図 3.14 それぞれのアルゴリズムにおける効果

### 3.4.3 考察

まず、図 3.8 及び図 3.14 より抑止について考察する。図 3.7 の抑止ダイヤから駅間停車している列車は確認できない。また、図 3.14 より駅間走行時間の延長に感じる損失は、事故列車の時刻区間を利用した乗客によるものであることから、駅間停車している列車がないことがわかる。よって、駅間停車を防ぐという目的を達成できたと言える。評価値は、駅間走行時間の延長に感じる損失の減少以上に、減少している。これは、駅間停車していた列車が駅で長時間停車している間に来た乗客を乗せることにより、その乗客の目的地までの所要時間が減少したからと考えられる。

次に、図 3.9・図 3.10・図 3.11・図 3.12・図 3.13 より時隔調整について3つのルールで適用した結果について、考察する。ルールαでは、大きな調整時間となったときに、他の列車を遅延させてしまう可能性がある。このことで駅間に停車してしまうことも十分に考えられる。また、乗客流解析の回数が増すにつれて評価値が悪化するという結果になったことから列車遅延がさらなる列車遅延となる計算結果とさせていることが分かった。このため、運転整理の手法として不相当であったと考えられる。ルールγは、図 3.12 より、構内作業等の旅客流動と関係ないところでも定時性を守ろうとする傾向が見られた。対して、ルールβは、構内作業等では遅延を許容しているため、その分、より計算式の値に近い時間で調整でき、ルールγより評価値が小さくなったと考えられる。図 3.15 でルールβとルールγでそれぞれダイヤにおいて特徴の出たところを示す。ただし、説明に關係する運用のみ実線とし、その他を点線とする。今回得られたそれぞれのルールの結果の傾向は、どのケーススタディーでも変化はないと考えられる。また、1回目の乗客流解析で最終的に下がる評価値の半分くらい下がっており、ループしなくともある程度アルゴリズム適用の効果があることが確認できた。

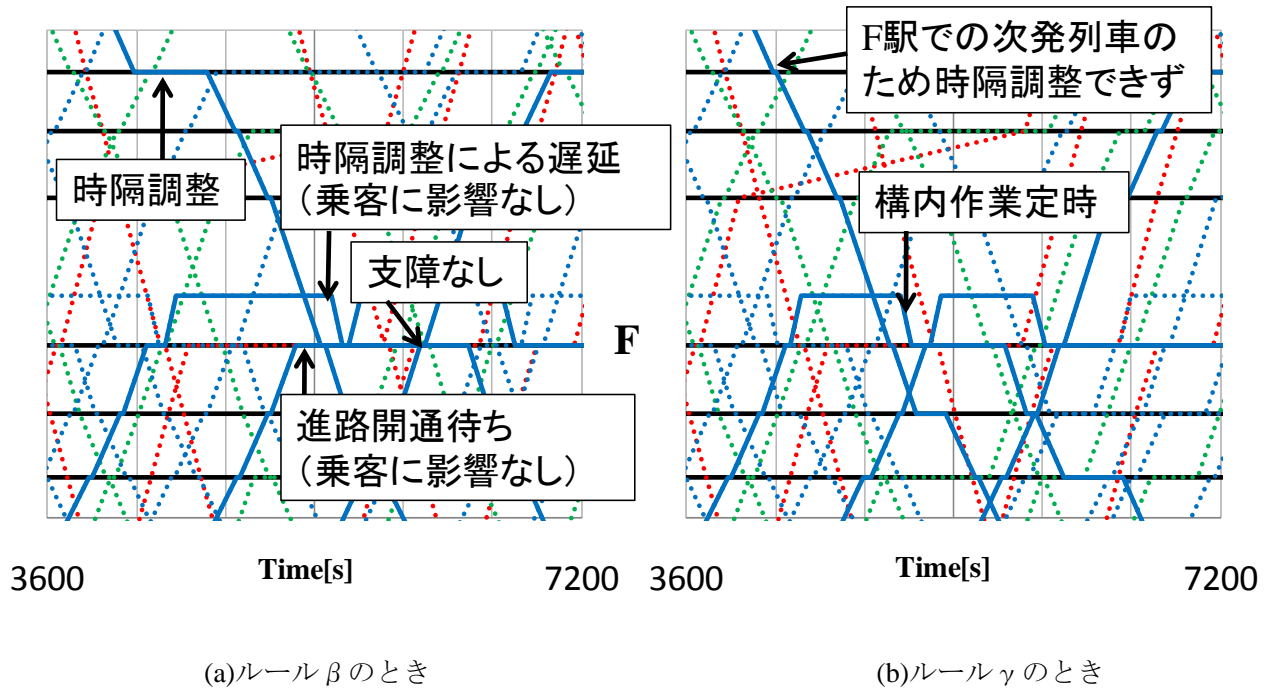
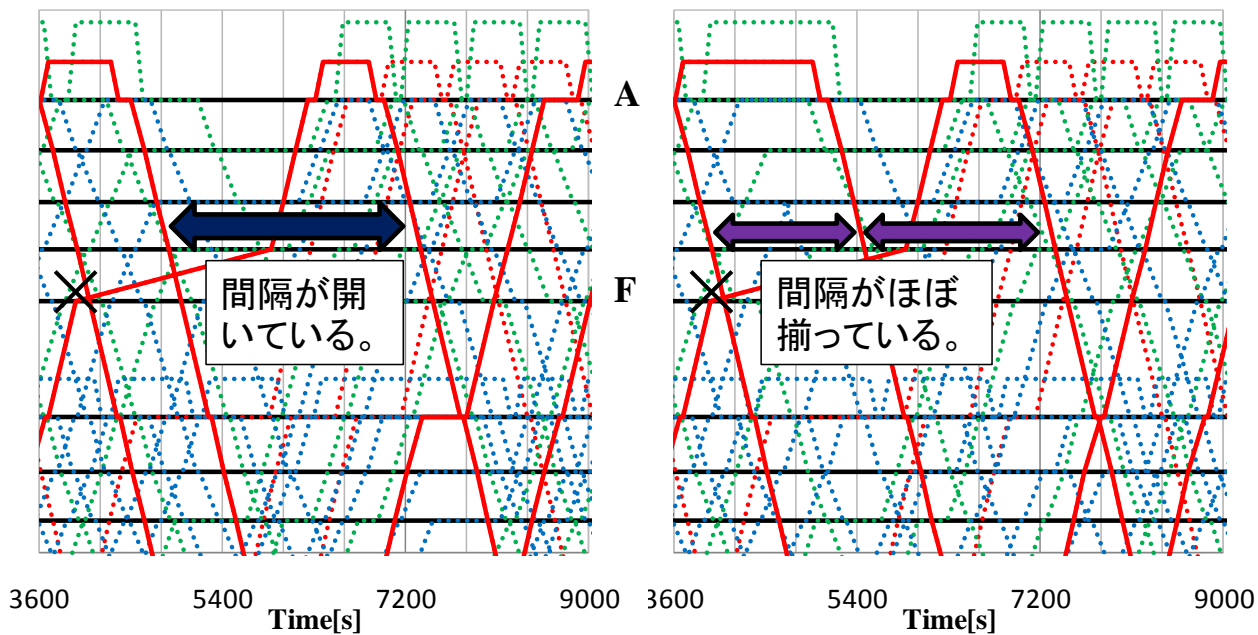


図 3.15 ルールβとルールγの特徴

最後に、ルールβを適用したときの効果について考察する。一般的に時隔調整は、混雑の偏在を防ぐために行う。この時隔調整のアルゴリズムを適用した結果は、図 3.14 より混雑による損失が抑止ダイヤよりさらに下がっていることから目的は果たされている。また、本アルゴリズムは、所要時間損失・駅での待ち時間に感じる損失を小さくすることを目的としており、その目的を満たした結果となっている。ここで、乗客の損失が減った箇所を1箇所挙げ、詳しく見てみる。図 3.16 に事故直後のA駅の拡大図を示す。抑止ダイヤよりも列車間隔が揃っている、別の表現をすれば、抑止ダイヤよりも列車密度が均一化されていることが分かる。定性的には、列車密度が揃っている方が、駅での待ち時間を含んだ平均所要時間が小さくなるため、乗客の損失が小さくなる。この箇所は、始発駅のため式(3.10)から効果がありそうな駅であり、実際にここで時隔調整する結果となっている。このケーススタディーにより、複数の運行種別があるような利用客の多い駅を結ぶ都市部の鉄道においても、列車間隔を揃えたほうがよいことが確認できた。ここまでの運転整理により詰めダイヤから比べ、評価値が約7割減少しており、効果があると言える。



(a)抑止ダイヤ

(b)調整ダイヤ

図 3.16 抑止ダイヤと調整ダイヤの比較



## 第4章

### 列車間隔を意識した運行順序変更

本章では、折り返しの部分において、列車が詰まることを回避するため、列車間隔を一定以上に保つ運行順序変更のアルゴリズムについて提案を行う。また、番線変更を行ったダイヤ案の評価も行う。

#### 4.1 運行順序変更と番線変更

運行順序変更とは、同じ線路もしくは番線において、使う列車の順序を変更する運転整理である。図4.1に駅の番線において、運行順序の変更例を示す。ただし、この変更には、関係する分岐器の進路制御のために、PRC ( Programmed Route Control ) のデータを書き換える必要がある。これは、PRC が列車の順序で制御されており、列車が通り過ぎてから次の列車の為に、進路を構成する仕組みであるからである<sup>[13]</sup>。

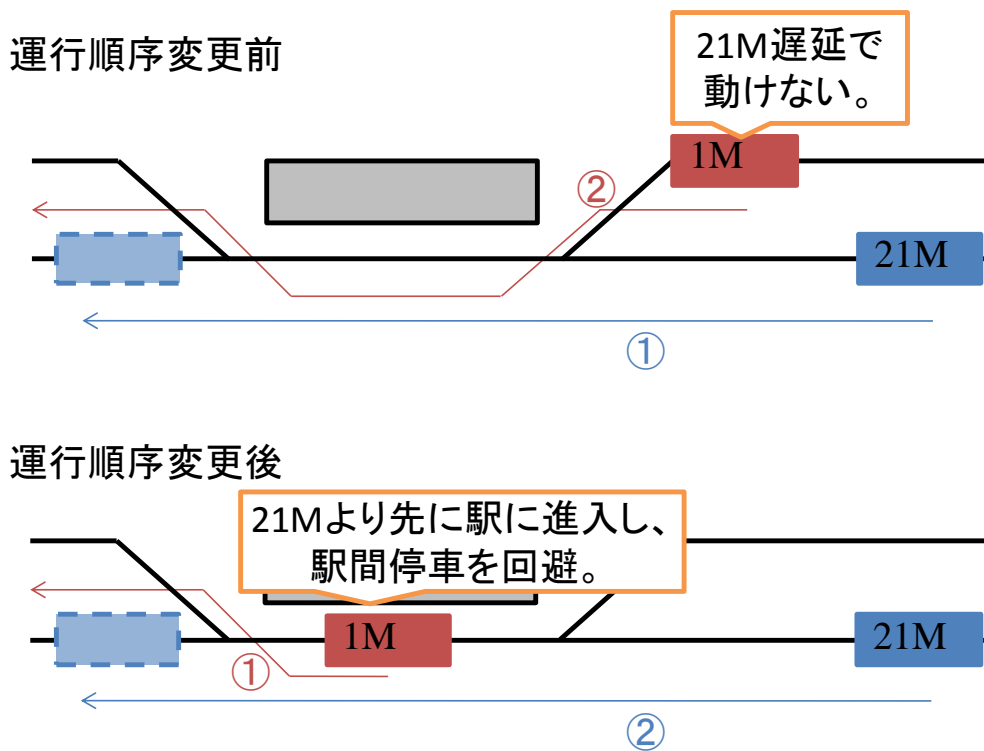


図 4.1 運行順序変更例

番線変更とは、駅構内で使用する番線を変更する運転整理である。例えば、本来進入するはずの番線に列車が止まっているときに、他に進入できる番線があり、列車がないときに、その番線に列車を進入させることを行う。図4.2に例を示す。これを用いれば、駅間での停車を防ぐことができる。

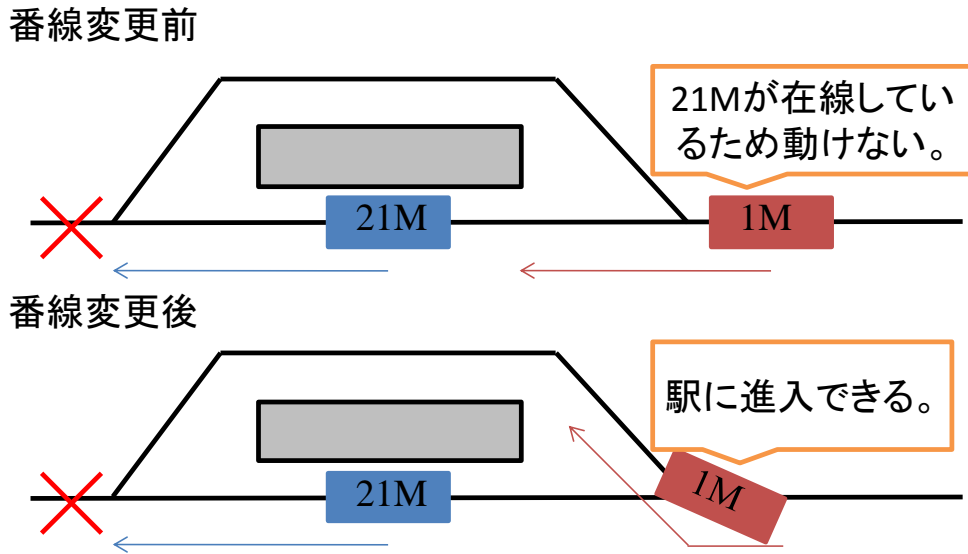


図 4.2 番線変更例

## 4.2 本システムにおける運行順序変更のアルゴリズム

列車ダイヤが乱れているときに一番詰まりやすいのは、第2章の図 2.9 より折り返しのところであることが分かる。これは、折り返しのときは一般的に番線を占有している時間が長くなってしまふからである。番線を長い時間占有してしまふ理由は、運転士や車掌の乗務位置を交換しなければならないため、運転台の機器の設定や編成長分の移動で、10 分程度かかってしまふ。よって、折り返し駅で列車が詰まらないように、予め列車間隔を付けておく必要があると考えた。この考え方にに基づき、ダイヤの素案を作成する。そのあと、素案で同じ進路上で交差してしまっているところを遅れている列車を優先として通し、交差する部分がなくなるまで繰り返してできた仮ダイヤを作成する。その後、時隔調整を行うことで、運行順序を変更したダイヤはできる。

### 4.2.1 列車間隔を意識した素案作り

折り返し駅において、折り返しのための線路は少ないものである。よって、その折り返し線を使う列車同士は、ある程度の間隔を付ける必要がある。種別が異なったり極端に運転区間が異なったりする場合には各駅でどのくらいの間隔を付けていれば競合しないかは、折り返し駅までに辿り着く時間が異なるので、ケースバイケースとなると考えられる。しかし、同じ種別で運行区間も似たような列車であれば、どの列車も同じような運転を行うことから、ある一定の間隔以上を保つことは容易である。列車間隔をなるべく等間隔、列車を等密度にした方が、駅の待ち時間を含めた乗客の平均所要時間は減少するため、評価値を下げるができる。これは、逆に不均衡の場合、列車間隔の開いたところでは、乗客が駅で長時間待たされ、さらにその分、乗客も多くなってしまひ評価値を悪化させてしまふ。よって、折り返し駅での進路競合防止と列車の等間隔化に伴う評価値の減少を期待し、ある程度の間隔を付ける。

具体的方法であるが、同じ種別、同じ運行区間の列車を同じ運行系統の列車として分類する。そして、他の運行系統の列車に関係なく、計画ダイヤもしくは事故の原因となった運行系統で遅延している列車は基準運転時分や最小停車時分で計画ダイヤより早くならない走行するダイヤとする。そして、各停車駅において同じ種別の列車は図 4.3 のような発・着及び発・発・着・着の時隔制約を満たすように、かつ、駅

第4章 列車間隔を意識した運行順序変更

間で停車しないようになるべく停車駅で抑止するように抑止も行う。図4.4にフローチャートを、図4.5に素案の例を示す。なお、これはケーススタディーにおいて、発-発時隔は発-発時隔が最大の駅の条件、つまり折り返し駅での条件とし、着-着時隔はここで設定した発-発時隔と同一とし、発-着時隔はここで設定した発-発時隔から各駅の最小停車時分としたもの、ただし、折り返し線はその線の発-着時隔である。

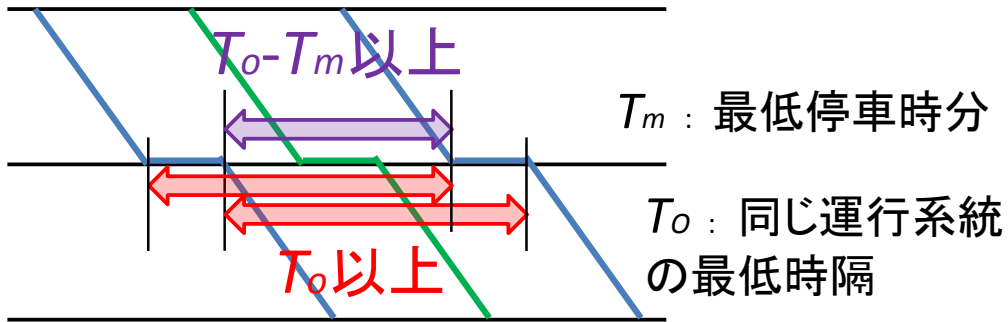


図4.3 運行系統毎の時隔条件

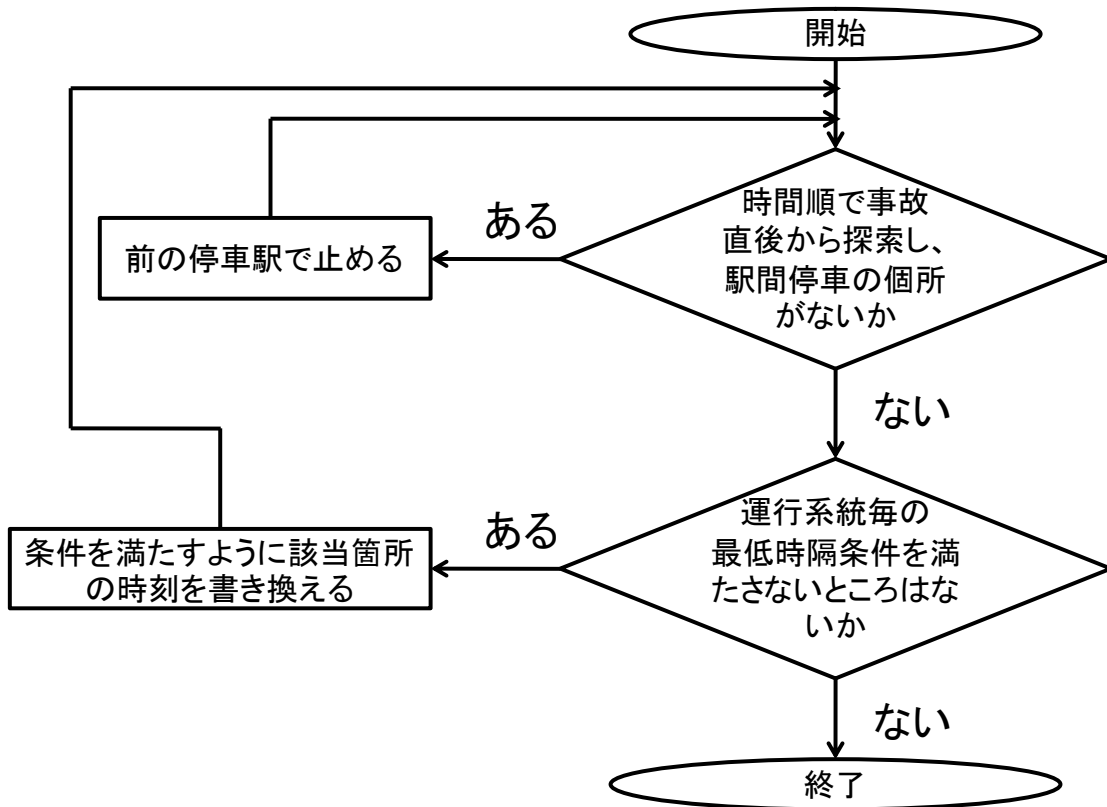


図4.4 素案作成のフローチャート

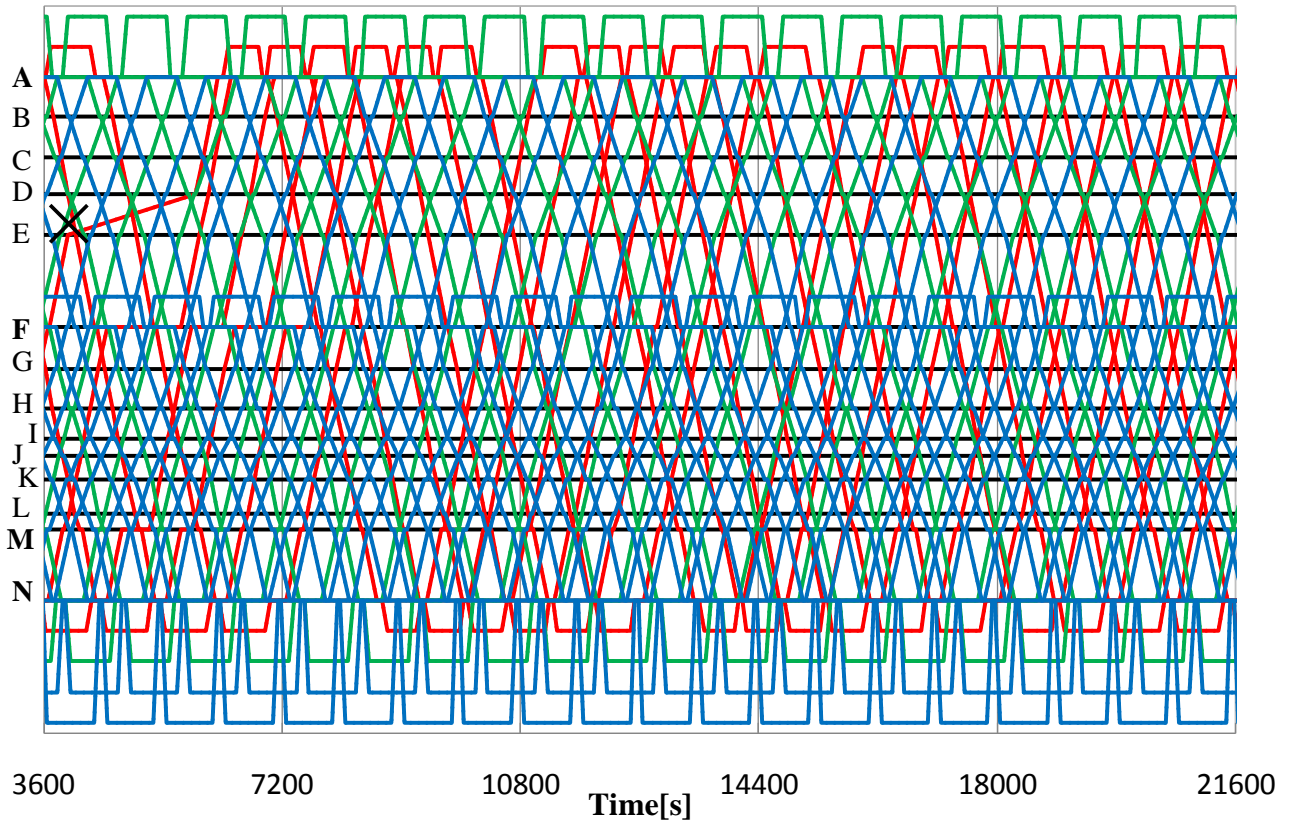


図 4.5 運行順序変更時の素案

#### 4.2.2 仮ダイヤ作成

列車のスジが物理的に不可能なところで交差しているのは、明らかに実行不可能なので、これを解消する必要がある。解消の方法であるが、交差している部分でどちらかを優先させればよい。ここでは、時刻が早い順に、交差している部分については、余計に遅延させないために、遅れている方の列車を優先とする。例えば、先に競合区間に入れる方を優先させると、図 4.6 のような状態のとき、さらなる遅延を引き起こすことになり、この状態が遅延している列車に何度も起きれば、ダイヤが回復しづらくなる。逆に、先に競合進路を出られる方を優先させると、図 4.7 のような状態のとき、ずっと遅れた状態になってしまう。また、評価値がよくなりそう、もしくはダイヤが平伏する時間が早くなりそうな選択をすればよさそうだが、そのためには、あらゆる組み合わせを考えることになり、大規模乱れではとても膨大になってしまう。即座に解を出すことが求められる運転整理において、それは致命的になりかねない。このため、確実に解を出せる、遅れている列車を優先させる方法を採用する。

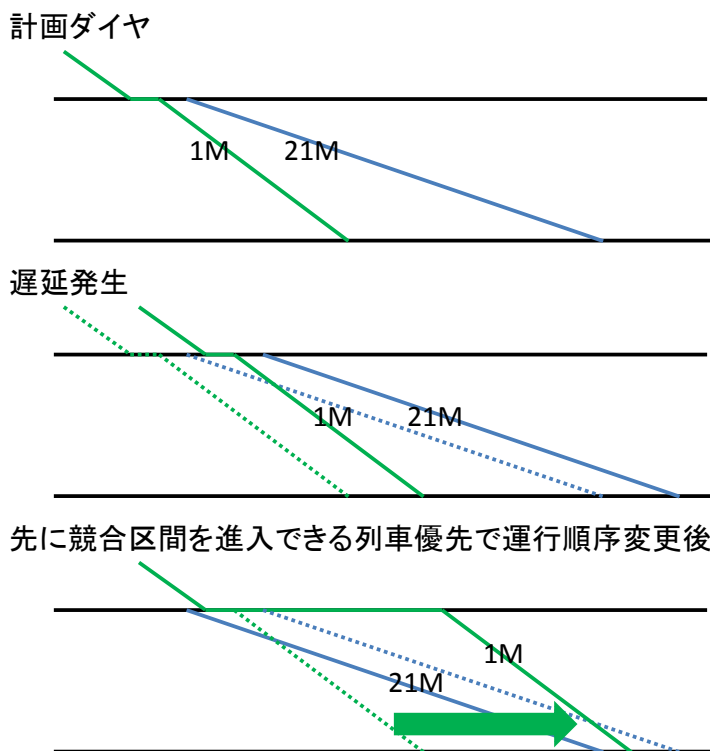


図 4.6 先に競合区間に入れる列車を優先にしたときの問題点

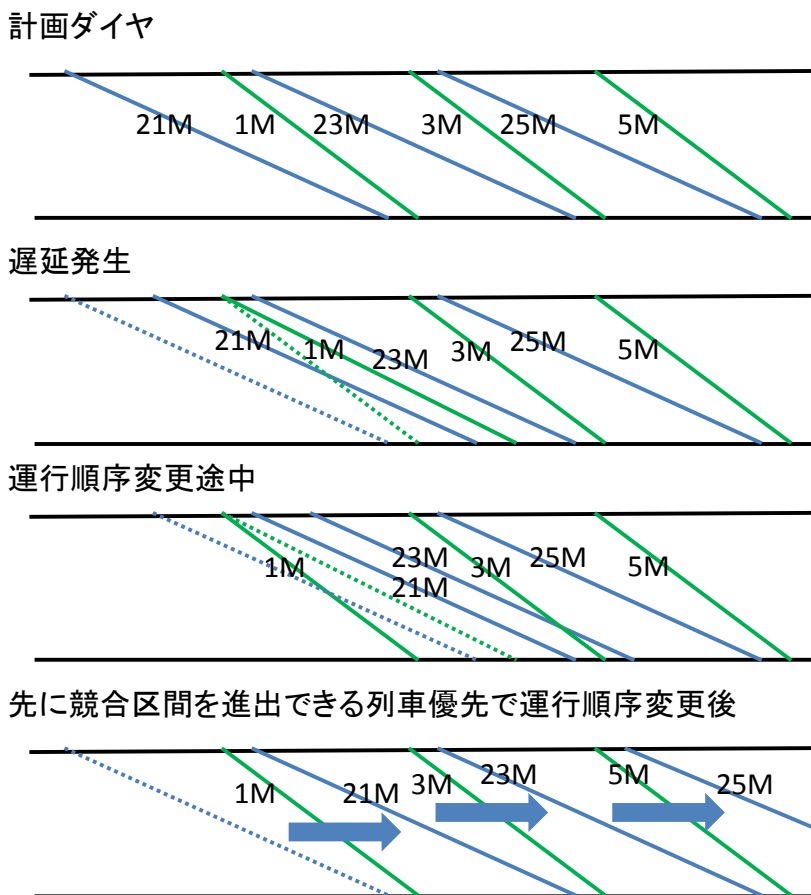


図 4.7 先に競合区間を出られる列車を優先にしたときの問題点

#### 第4章 列車間隔を意識した運行順序変更

交差を解消するにあたって、交差していないまでも、本来確保しなければならない時隔より短ければ、その時隔を確保するように後続列車のダイヤを修正する。また、このアルゴリズムで時刻の変更が生じるたびに、4.2.1 で述べた同じ運行系統の列車毎にある一定間隔以上つけること、また抑止を行う。仮ダイヤの作成のフローチャートを図 4.8 に、仮ダイヤの例を図 4.9 に示す。図 4.9 では、同じ進路上のスジの交差が無くなっていることがわかる。図 3.10 の調整ダイヤでは、事故直後に、準急や普通が A 駅に到着出来ていなかったが、図 4.9 の仮ダイヤでは、A 駅に到着できており、途中駅で長時間停車しないため、所要時間損失や駅待ち時間に感じる損失が減少すると考えられる。

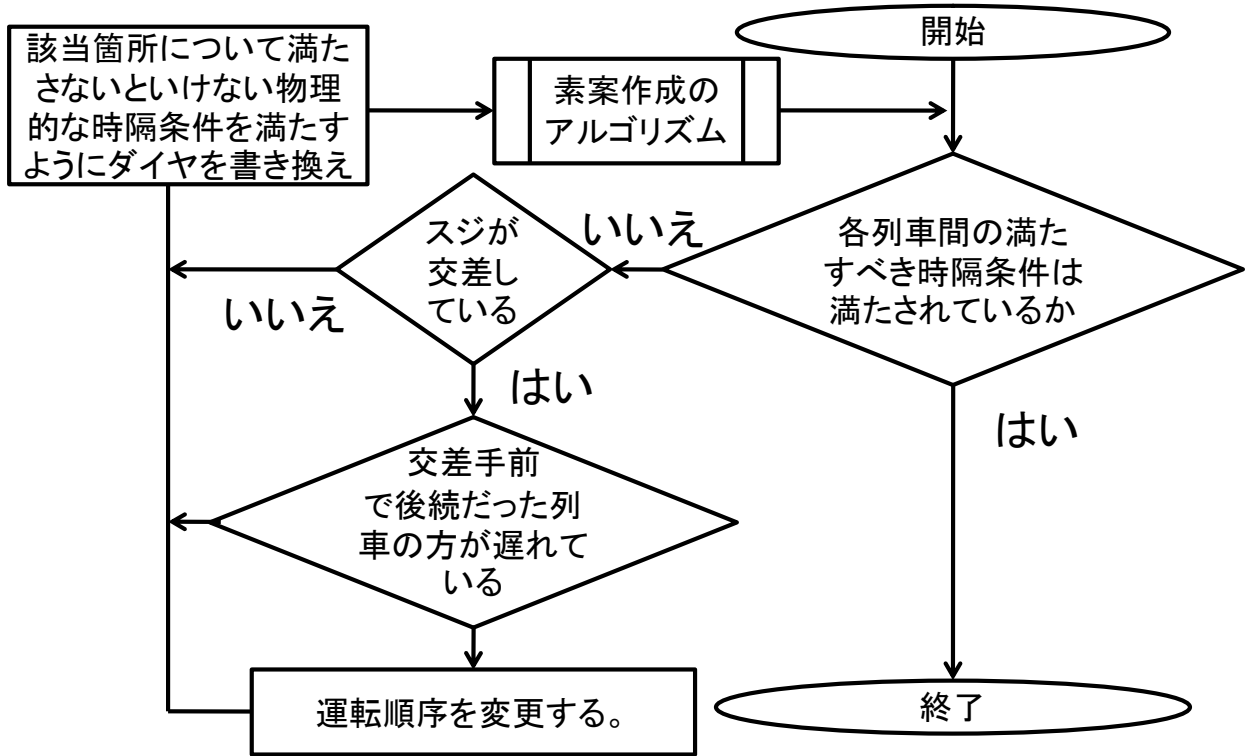


図 4.8 仮ダイヤ作成のアルゴリズム

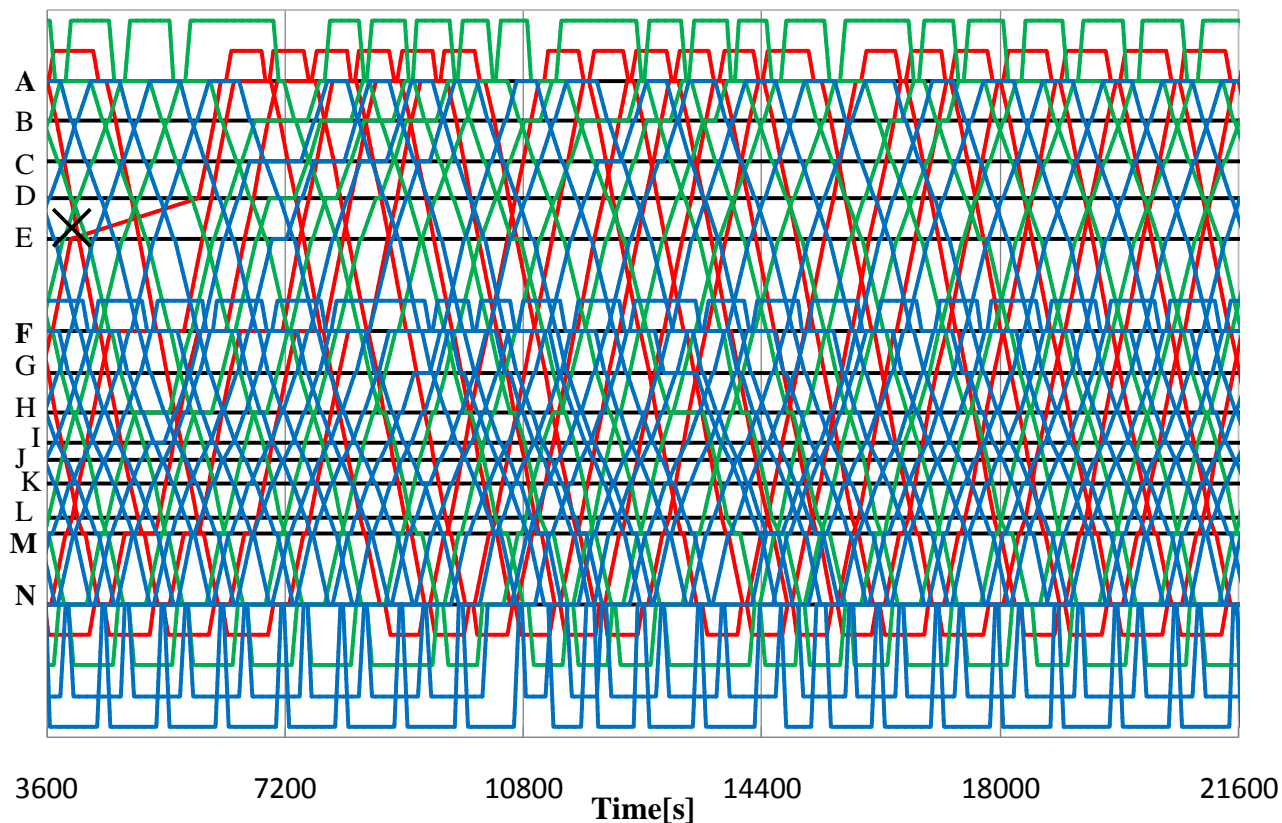


図 4.9 運行順序変更時の仮ダイヤの例

### 4.2.3 運行順序変更したダイヤの完成

最後に、仮ダイヤに時隔調整のアルゴリズムを適用し、運行順序変更を行ったダイヤを自動生成する。また、運行順序変更を行ったダイヤの例を図 4.10 に示す。

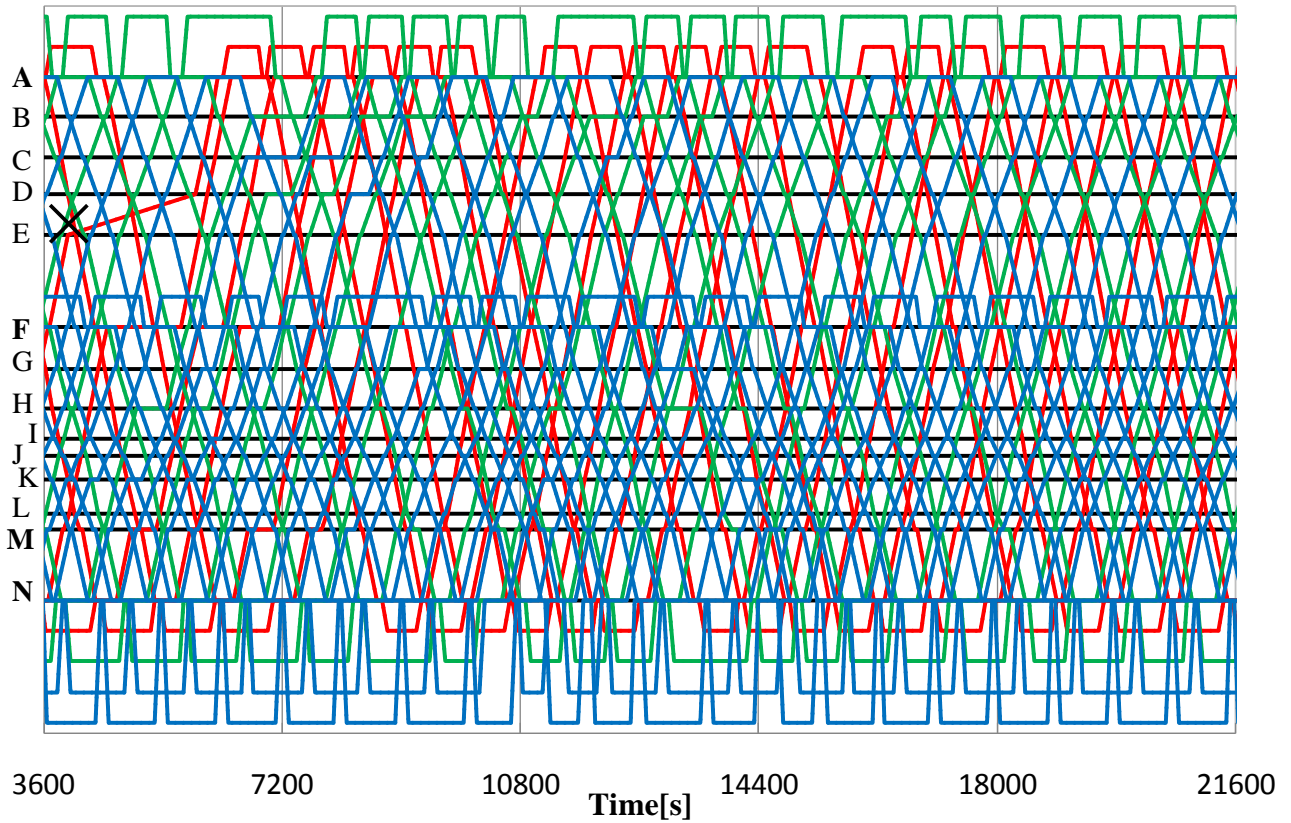


図 4.10 運転順序変更したダイヤ例

### 4.3 番線変更の考え方

番線変更を行うためのフローチャートを図 4.11 に示す。番線変更を採用するか判断に乗客損失に基づく評価値を使用することにより、評価値を下げることを目指す。

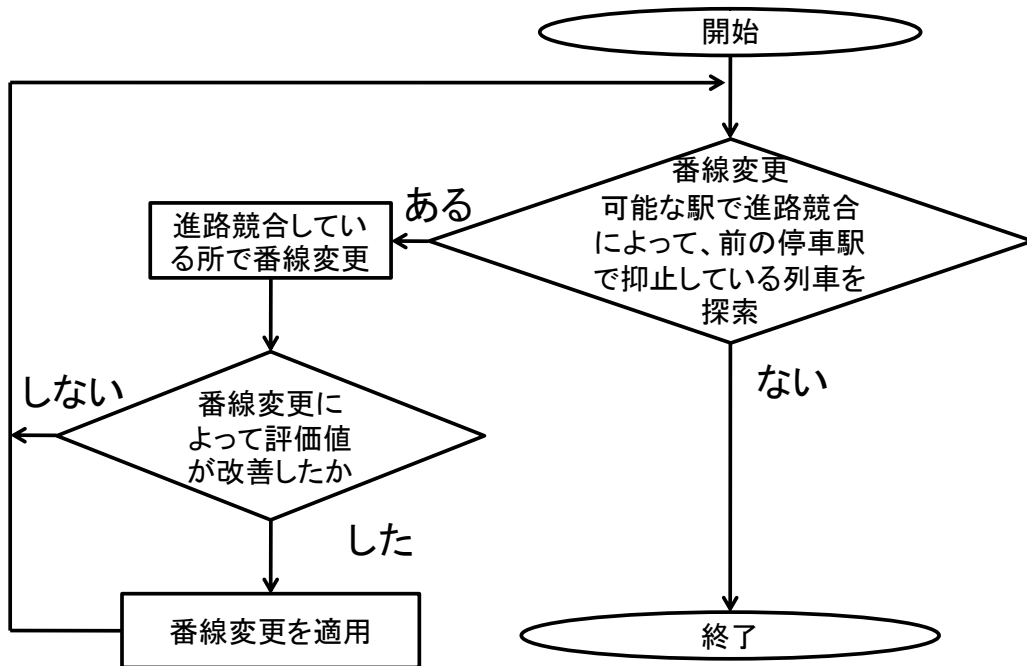


図 4.11 番線変更のフローチャート



#### 4.4 運行順序変更と番線変更の適用効果

##### 4.4.1 運行順序変更の結果

ここで、ケーススタディーにおける発-発時隔を4.2.1で決めた値の1倍から4倍まででシミュレーションを行った。なお、他の時隔の決定の仕方は4.2.1と同じである。1倍(195秒)・2倍(380秒)・3倍(585秒)の評価値の結果を調整ダイヤの結果も含め図4.12に示す。なお、順序変更なしの項は調整ダイヤの結果である。また、図4.13には、2倍のときの、図4.14には、3倍のときのダイヤ案を示す。なお、1倍のときのダイヤは、既に図4.10に示している。4倍の結果であるが、ダイヤ乱れが収束しなかった。

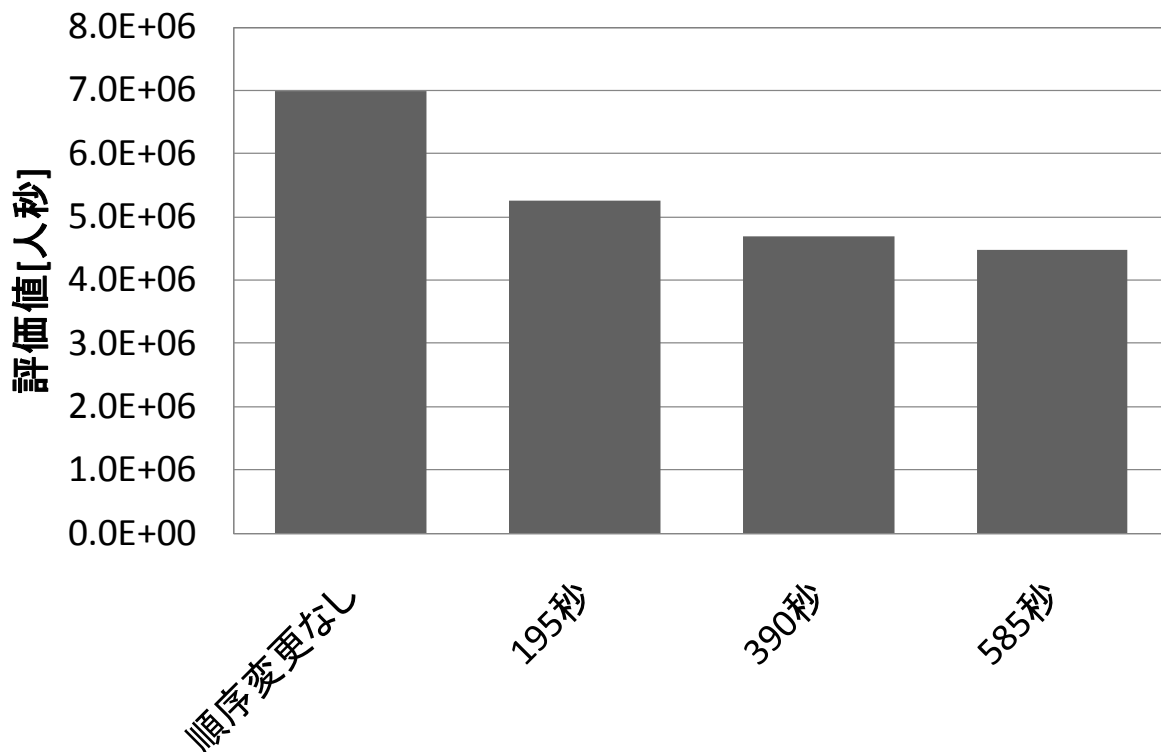


図 4.12 運行系統毎の時隔と評価値

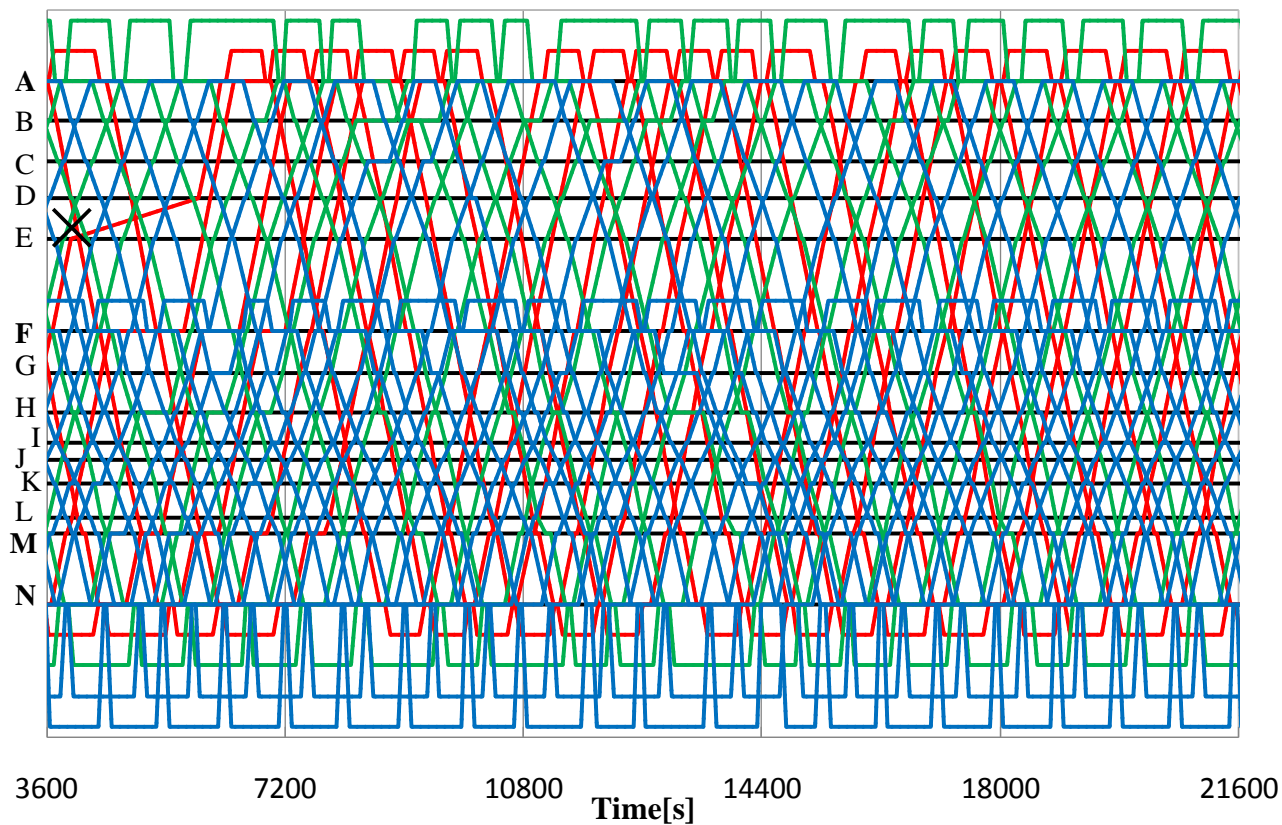


図 4.13 運行系統毎の時隔が2倍時のダイヤ

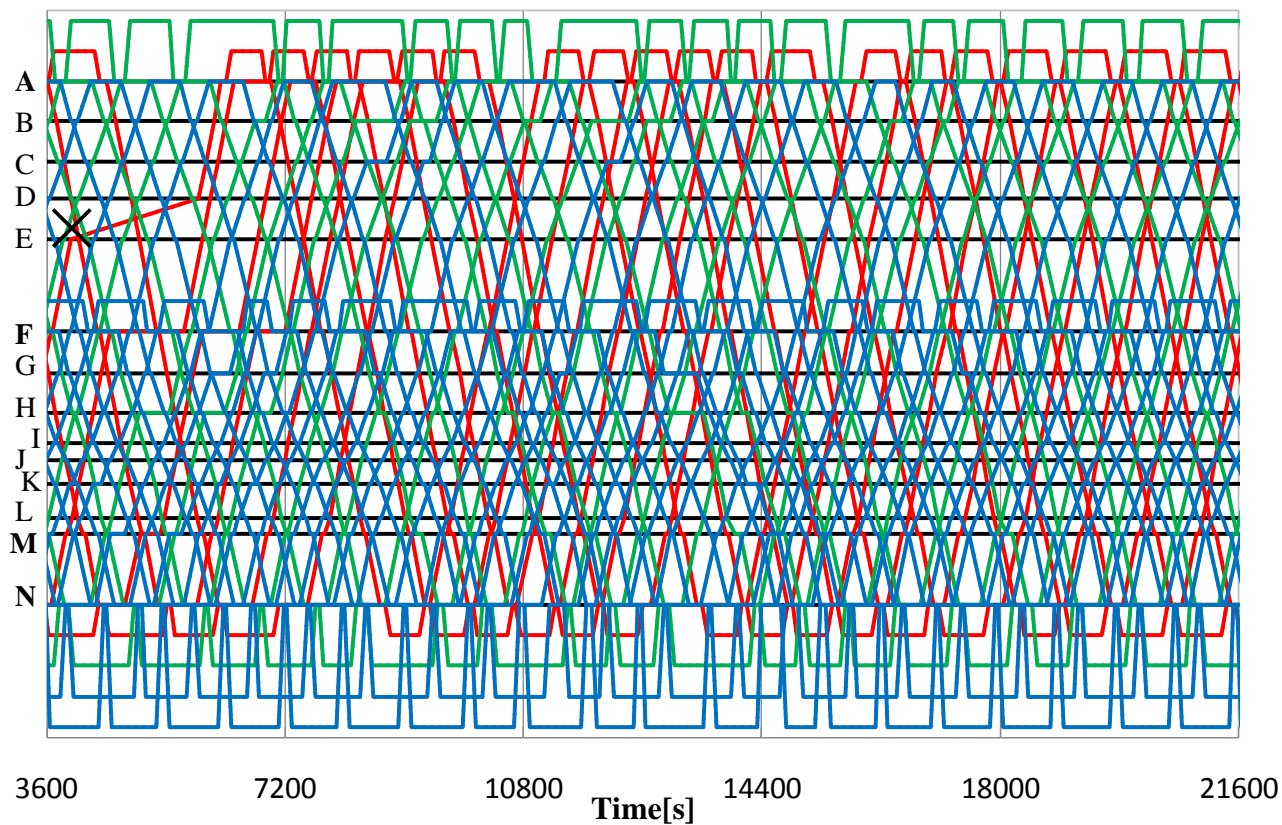


図 4.14 運行系統毎の時隔が3倍時のダイヤ

4.4.2 番線変更の結果

番線変更を適用したダイヤを図4.15に示す。また、評価値を図4.16に示す。ただし、運転線路変更のみのダイヤは時隔585秒のものである。

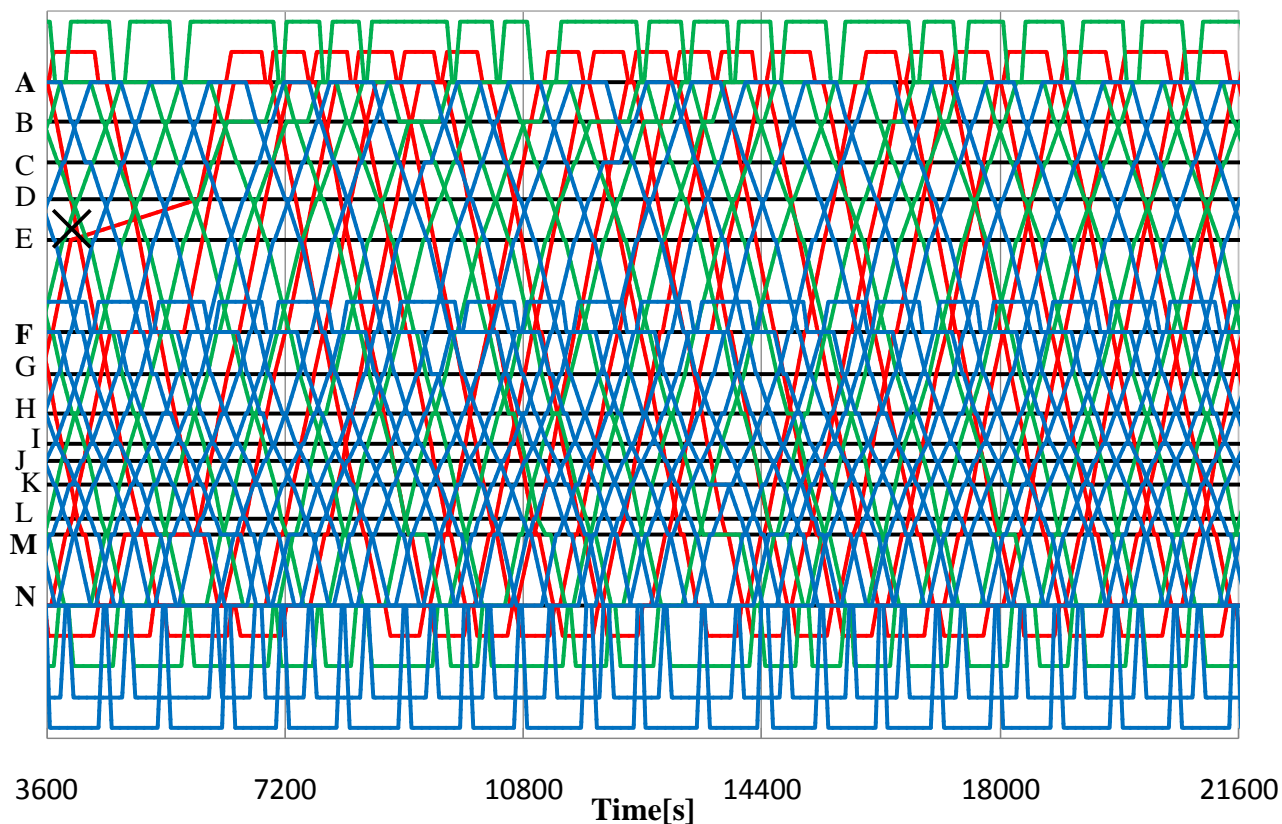


図 4.15 番線変更を適用したダイヤ

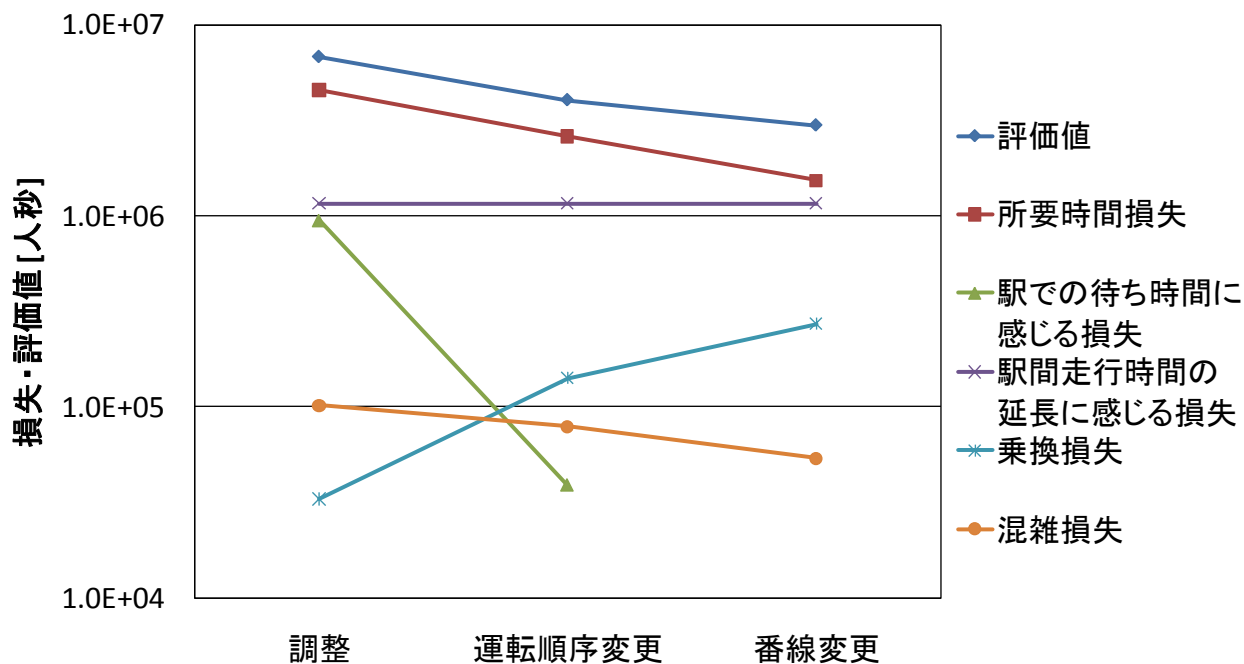


図 4.16 運転線路変更及び番線変更の効果

4.4.3 結果の考察

まず、図 4.10 に示した発-発時隔 195 秒のときのダイヤと、図 3.11 に示した抑止・時隔調整を行ったときのダイヤとを比較する。最大の特徴は、運行順序変更前は事故直後に A 駅に上り列車が到着しなくなってしまっていたのに対して、運行順序変更後は到着できるようになっている点である。運行順序変更によって、列車密度が平準化されたために、評価値が下がったと考えられる。図 4.17 に該当箇所の拡大図を示す。なお、運転順序変更したダイヤにおいて事故列車よりも先に到着して、かつ、調整ダイヤでは事故列車の後に A 駅に到着した列車の運用のみ実線とし、他の列車は点線とする。

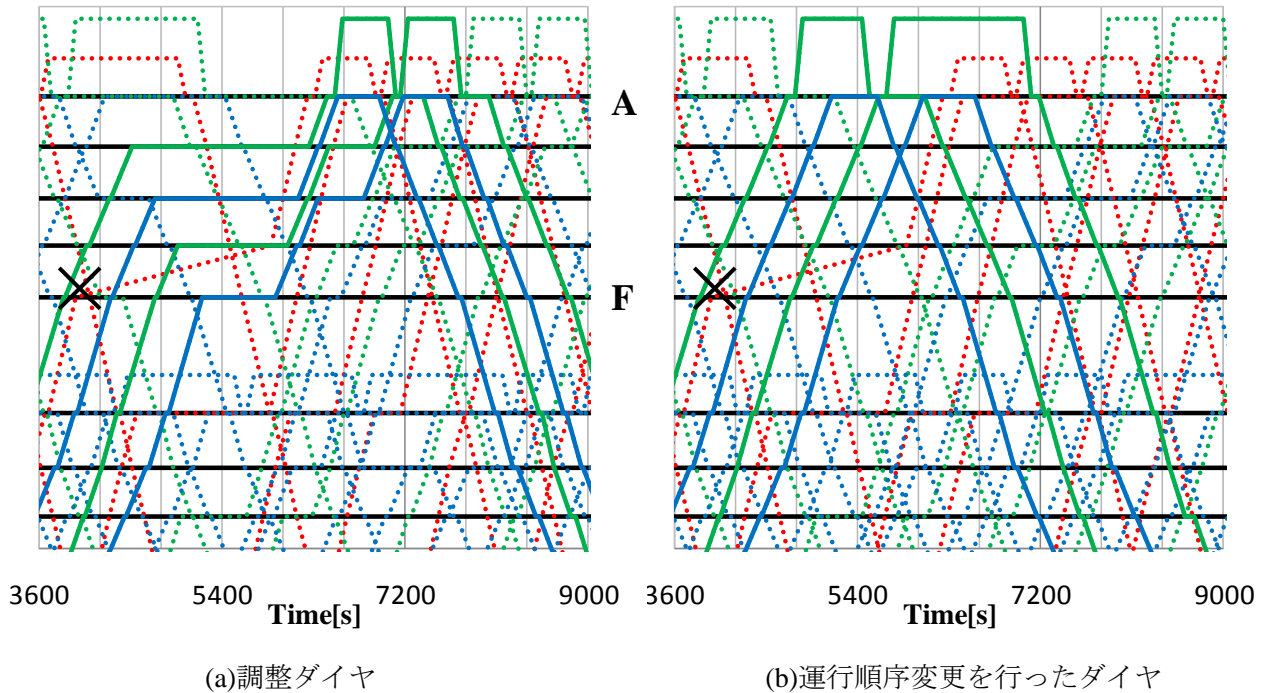


図 4.17 調整ダイヤと運行順序変更したダイヤの比較

図 4.12 より、運行順序変更を行うときには、同じ運行系統の列車の間隔は、ダイヤが収束しなくなる程度に開けるとよいという結果になった。今回、1 倍の発-発時隔は 3 分 15 秒（195 秒）であった。その時隔の 3 倍は 9 分 45 秒、4 倍で 13 分となる。まず、1 倍のときは、遅れている運行系統の間に違う運行系統の列車が入り込むことができない。そのため、事故復旧後からは、遅れていなかった運行系統を犠牲にした運転整理が行われることになる。それが、評価値が良くなかった理由と考えられる。

逆に、4 倍のときには、ダイヤが回復しなかった。同じところでの折り返しの続行時隔は普通で 10 分、急行で 12 分 30 秒であることから、その値を超えると折り返しの能力を上手使えなくなる。その分、遅れからの回復が遅れる可能性がある。そこで、運行系統毎に折り返しの続行時隔を発-発時隔に定めてシミュレーションを行っても、ダイヤは収束しなかった。ここで、収束しない原因を考える。素案で交差し、後ろに回された列車については、その箇所で遅延が発生する。このとき、予め列車間隔を開けすぎていると、1 サイクルの 15 分をオーバーする可能性がある。これが連鎖的に起こると、ダイヤが収束しないことが考えられる。

#### 第4章 列車間隔を意識した運行順序変更

3倍のときは、遅れている運行系統の間に、他の列車が走りやすいために評価値が下がったと考えられる。1倍のときとの比較のための拡大図を図4.18に示す。図4.18から分かることは、折り返し駅での進路競合を緩和することで、列車の長時間抑止を防いでいる。つまり、列車密度の平準化が図られていることが分かる。

4倍のとき収束しなかったことから、ダイヤの回復にも支障がない程度がよいことが言える。3倍のときの結果と合わせて考えると、ダイヤの1サイクル時間から進路競合による遅延が起こる時間を引いた時間を素案・仮ダイヤでの運行系統毎の時隔とするのがよいと考えられる。進路競合によって遅延する時間は、進路競合による開通時隔及び退避可能駅間の種別による所要時間差が考えられる。つまり、ダイヤの回復を妨げない程度に開くのがよい。

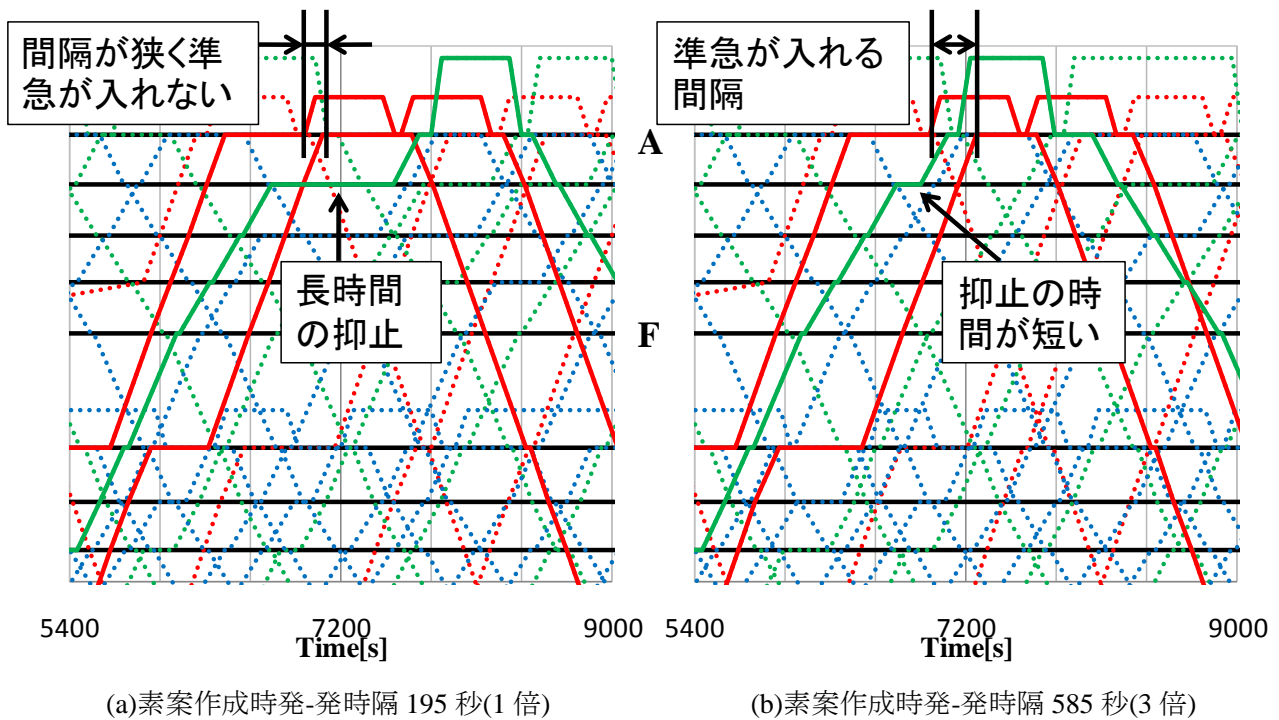
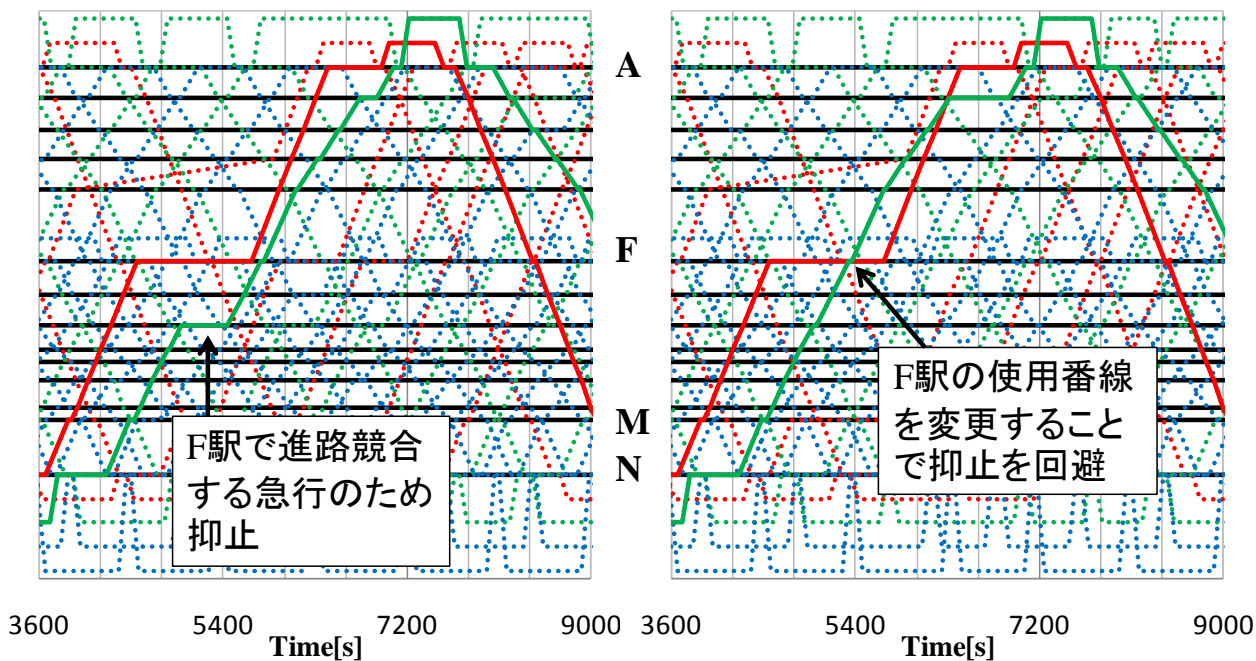


図 4.18 素案作成時の発-発時隔によるダイヤの違い

番線変更について、ダイヤが大きく変わったところの例として、抑止している急行を準急の番線変更で追い越しているところであるが挙げられる。その部分を拡大した番線変更をしたダイヤと、比較対象である番線変更をしていない運行順序変更をしたダイヤを図4.19に示す。この運転整理により、普通も詰まらなくなり、列車の偏在を緩和しており、これが評価値の低下につながったと考えられる。また、評価値の混雑損失が減少していることから乗客の偏在も緩和している。なぜならば、図2.4より乗車率100%未満であれば、各列車での乗客数の2乗で損失が求められる為である。また、番線変更時に待ち時間に感じる損失が負になった。理由としては、図4.14で後続の準急が急行を追い越しており、利用の多いN駅やM駅からA駅に行くのに、駅での待ち時間が計画ダイヤより小さくなっていることが考えられる。



(a)運行順序変更したダイヤ

(b)番線変更も行ったダイヤ

図 4.19 番線変更によるダイヤの変更

## 第5章

### 大規模乱れ時に適用する運転整理

本章では、大規模乱れ時に適用される運休及び、複々線で適用可能な運転線路変更についてその効果を示す。

#### 5.1 運転線路変更と運休

運転線路変更は、複々線特有の運転整理手法である。図 5.1 に概要を示す。このように、運転線路を変更するには、その線路同士が繋がっていることが条件である。一般的には、方向別複々線は同じ方向に行く線路が隣接しているため、運転線路変更が行いやすい。ただし、運転線路毎に駅間の所要時間が異なり、一般的には各駅停車等が走る線路は設計最高速度が遅いため、同じ停車駅であっても、基準運転時分は長くなる。また、普段走る線路では通過することが可能な駅でも、踏切制御等の関係で、違う線路のとき通過不能であることがある。よって、所要時間が増大することがある。

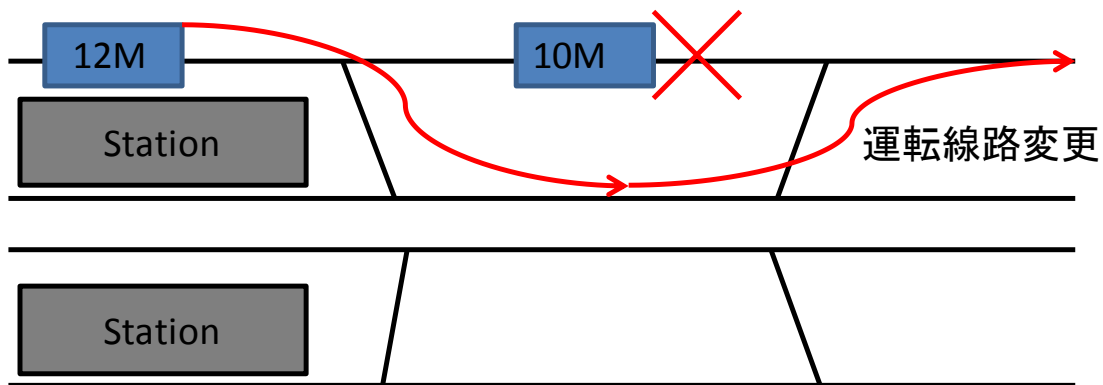


図 5.1 運転線路変更

運休には、いくつか種類がある。ここでは、新たに編成を用意しなくともできる運休を 2 つについて説明する。1 つは、山切りと呼ばれるもので、概要を図 5.2 に示す<sup>[21]</sup>。もう一つは、バッテン切りと呼ばれるもので、概要を図 5.3 に示す<sup>[21]</sup>。この種の運休について言えることは、ある片方向の運休区間と運休本数は反対側でも一致しないとはいけない。その上下での運休の組み合わせで同じ運用か異なる運用かの違いである。

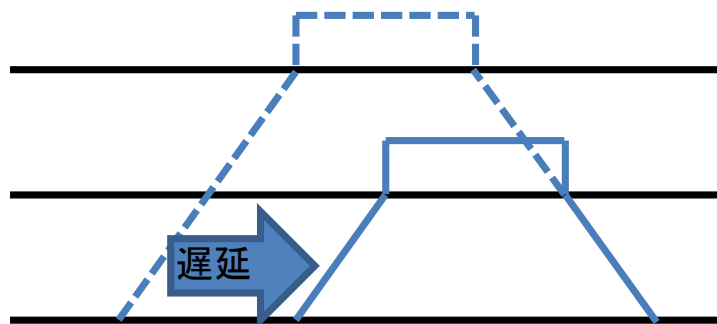


図 5.2 山切り

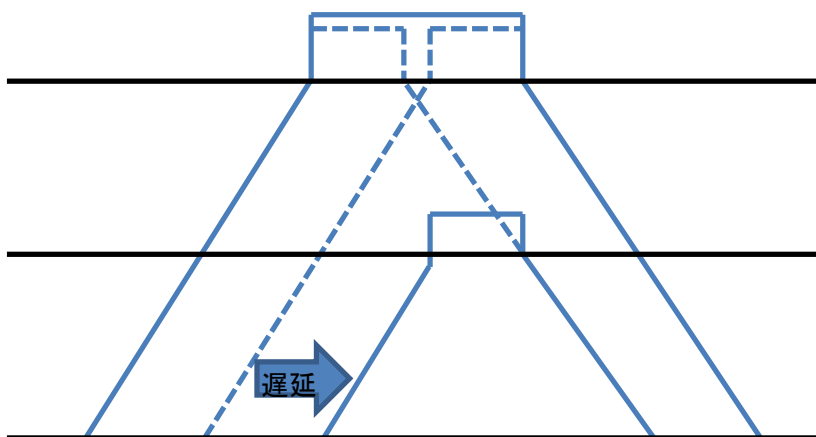


図 5.3 バッテン切り

## 5.2 運転線路変更と運休の適用効果

### 5.2.1 運転線路変更の結果

運転線路変更は、5.1 章で述べたように、運転線路変更先のダイヤを乱しうる。また、運転線路変更するためには、現場社員へ知らせなければいけない等やらなければならないことがある。今回、まず、列車 1 本に適用した。その 1 本は、事故列車の 1 本後の列車で、運転線路変更可能な途中駅 F 駅から A 駅までである。その後ろの列車を運転線路変更すると事故列車の計画時刻より 15 分程度の遅延で折り返しの A 駅に着く。その列車を事故列車の次の充当先である列車を割り当てれば、遅れは約 30 分から 15 分に短縮される。運転線路変更を行わず、これは、輸送力を削らず、ダイヤ遅れを回復する方法となっている。

この方法を用いたときの順序変更後のダイヤを図 5.4 に示す。なお、点線は計画ダイヤを表す。

次に、運転線路変更を事故列車の 2 本後で行うことを考える。しかし、A 駅で事故列車と進路競合することが想定される。また、図 5.4 の結果から分かるように、内側線を走行する準急を遅延させてしまうことから、逆効果になると考えられる。



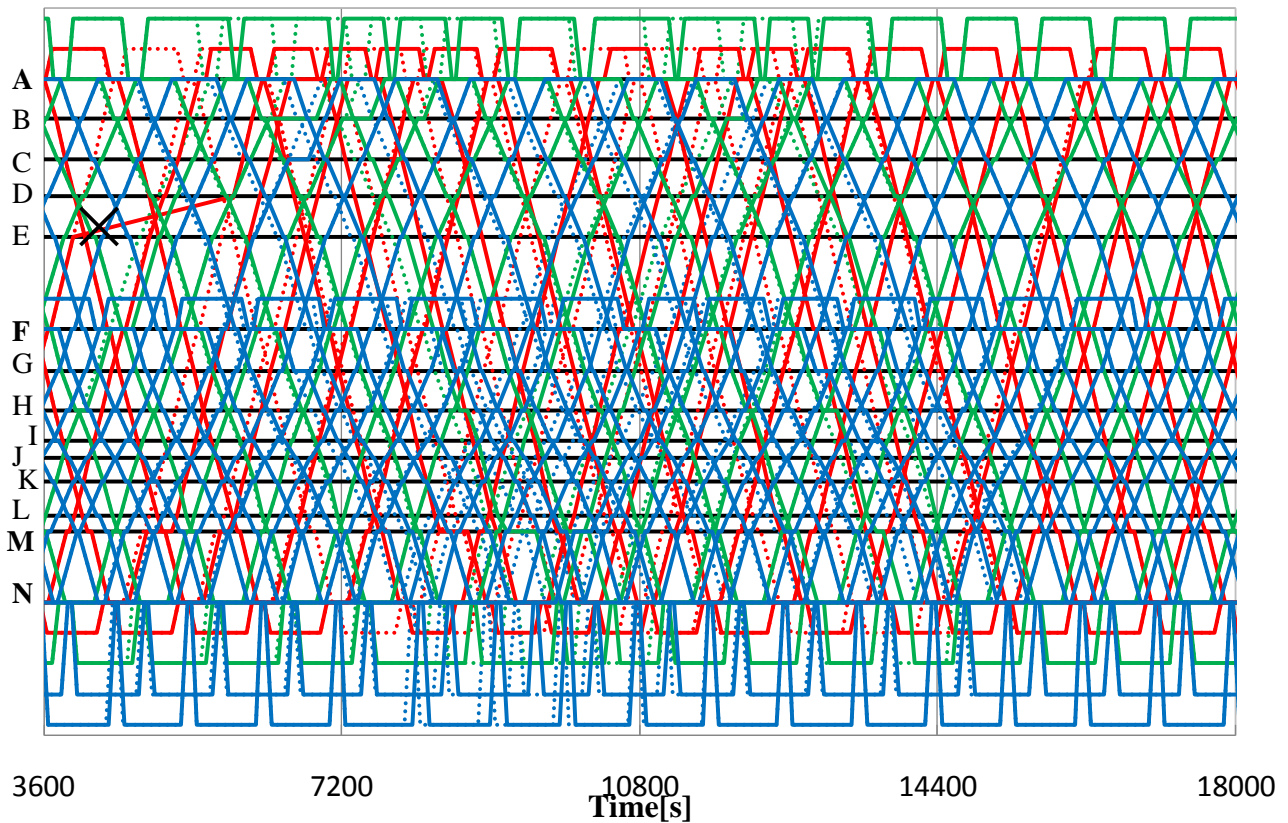


図 5.4 運転線路変更したときのダイヤ

### 5.2.2 運転線路変更に加え運休を行った結果

5.2.1 のように運転線路変更のみでは、列車ダイヤに遅れが残ってしまう。よって、遅延をなくするためには、輸送力と引換に、上りを事故列車の2本後の急行、下りを事故列車が折り返すはずだった急行をA駅からF駅を運休するバッテン切りを行えば、ダイヤの早期回復は可能である。しかし、運休した列車に乗ろうとした乗客は、後続の列車を待たなければならず、所要時間が増大し、評価値が下がってしまう恐れがある。

今回、シミュレーションを行い、ダイヤが運休後定時に戻るか、また、評価値がどうなるかシミュレーションを行った。その結果のダイヤを図5.5に示す。結果であるが、ダイヤは運休し、折り返しのF駅の発車で定時に戻っている。

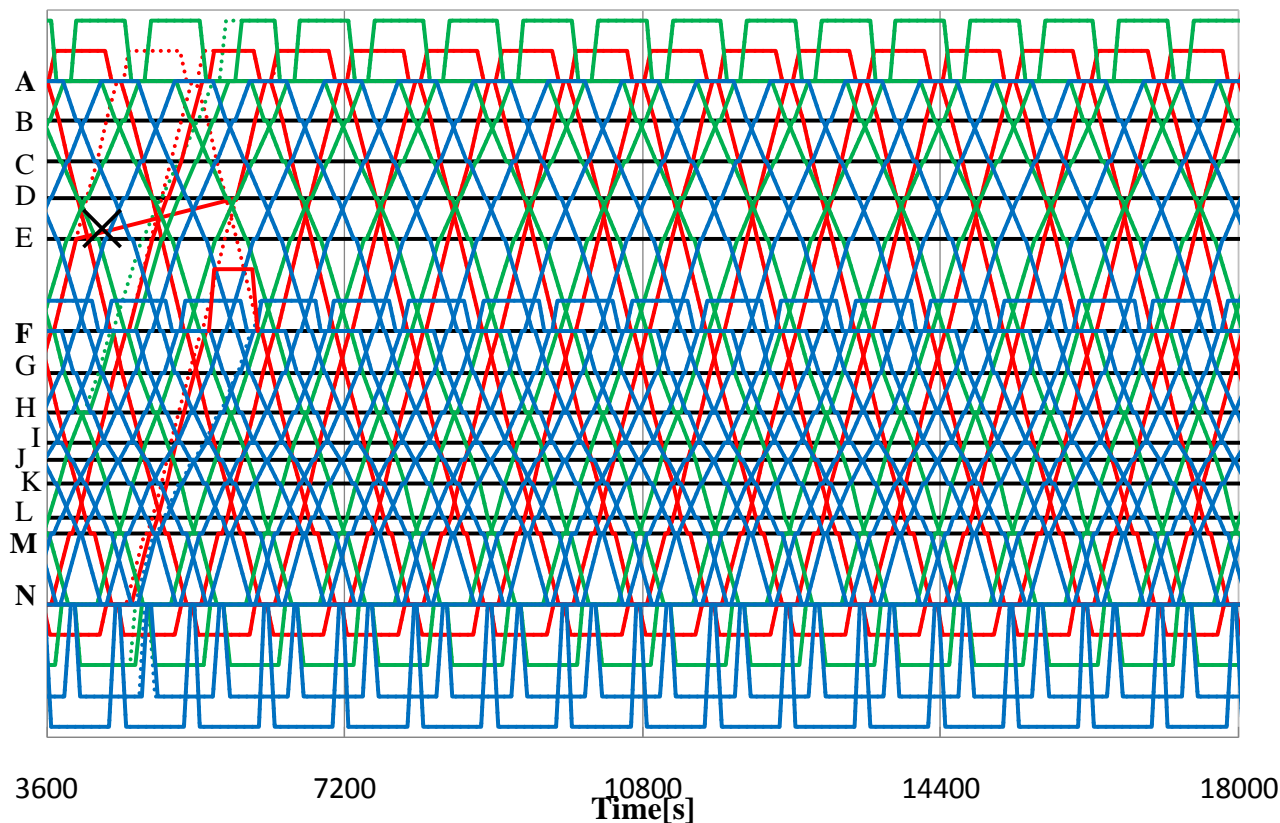


図 5.5 運転線路変更に加え運休したダイヤ

### 5.2.3 運転線路変更及び運休の考察

運転線路変更や運休を行っていない第4章のダイヤ案と今回の2つのダイヤの評価値との比較を図5.6に示す。

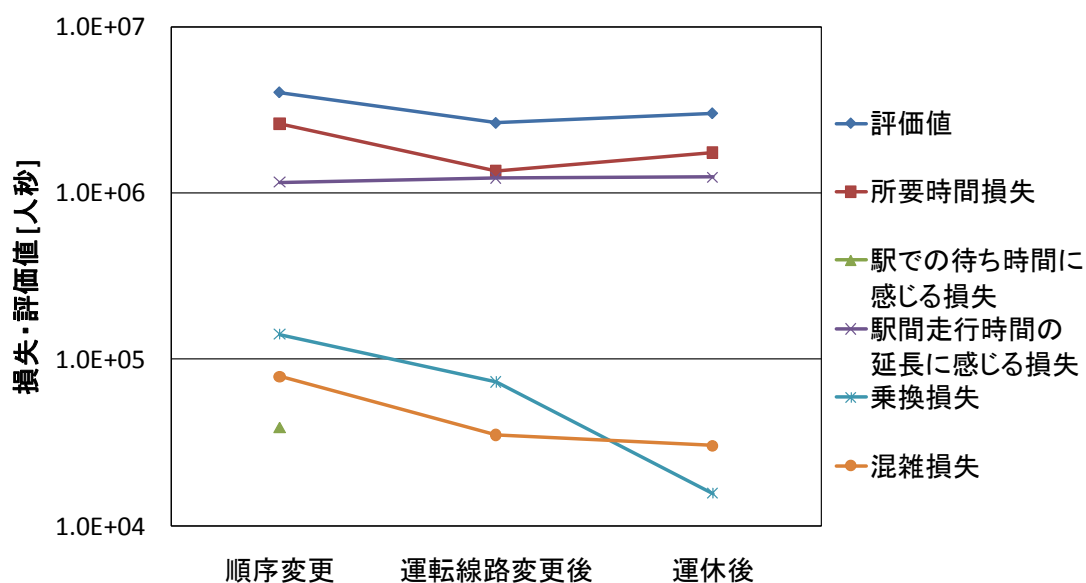


図 5.6 運転線路変更と運休の効果

## 第5章 大規模乱れ時に適用する運転整理

運転線路変更したダイヤについて、待ち時間に感じる損失が運転線路変更を適用したダイヤ案で表せていないが、C 駅に内側線を走る急行列車は停車するようになっているため、その駅での待ち時間が短くなったことによるものと考えられる。また、評価値は運転線路変更を行わなかったものよりよくなっており、乗客視点での評価においては、効果的であると言える。

運休もしたダイヤも、待ち時間に感じる損失が負になったのは、5.2.1 のケースと同じ理由であると考えられる。やはり、評価値は単純に運転線路変更を行っているのみのものより増加してしまっている。しかし、運転線路変更しない順序変更のみのダイヤよりよくなっている。逆に言えば、列車遅延が長く続く状態は、乗客の損失を増大させるということを表している。早くダイヤ乱れを収束させる効果が確認できたので、早くダイヤ乱れを収束させる必要があるときは、運転線路変更と運休を組み合わせることは、有効的な方法である。まとめると、本ケーススタディーにおいては運転線路変更が乗客の損失を低減させるのにより運転整理であることが分かった。運休については、列車乱れの収束を早める効果確認できた。また、運転線路変更との組み合わせで、評価値は悪化するが、ダイヤの乱れが運休のため折り返した駅の出発時には解消された。

## 第6章

### 結論

#### 6.1 まとめ

本論文では、運転整理システムの概要について述べた。そして、大規模乱れを扱うために、両方向に対応したシミュレータを作成し、大規模乱れに対応した運転整理システムを提案した。また、提案手法を乗客視点で評価し、その有効性を示した。具体的には、以下に挙げるものである。

##### (1) 乗客流を考慮した時隔調整

上下両方向に対応した大規模乱れ時においても効率よく、時隔調整を行う手法について提案した。具体的には、余裕時分の項を消すことができた乗客の損失を最小にするような簡易的な算出式を用いて、時刻順の後から時隔調整を行うものである。この手法を適用した結果、列車の偏在を緩和し、所要時間等、乗客の損失を減らすことができることを示した。また、時隔調整については、調整時間の範囲を非負で、時隔調整対象でない列車の停車駅での到着を遅らせない程度に行うのがよいことを示した。

##### (2) 折り返しを意識した運行順序変更

折り返しのところでは、列車が詰まりやすいため、折り返しでの詰まりを防止できる運行順序変更の手法を提案した。運行系統毎にある程度の間隔を持たせて走らせることにより、折り返し線及び折り返し駅の進路競合を防ぎ、かつ、列車密度を平準化することにより、乗客の損失を低減できることを示した。また、運行系統毎の間隔であるが、広いと折り返し駅での進路競合を防ぐことができる。しかし、広すぎるとダイヤ乱れが収束しなくなる。この2点をシミュレーションの結果から示した。このことから、ダイヤの1サイクル時間から進路競合の時隔や待避駅間の所要時間差を引いた間隔、つまり、遅延の回復を妨げない程度に間隔を運行系統毎につけるのがよいことを結論づけた。

他に、乗客の趣向を考慮した乗客流推定を提案した。具体的には、乗換をしたくない乗客の行動を考慮することで、単一経路を仮定するよりも現実に即した推定をすることができるものである。

また、抑止、番線変更、運転線路変更、運休についての効果について本運転整理システムを用いて示した。抑止や番線変更、そして複々線特有の運転線路変更については、乗客の損失という観点からその有効性を確認することができた。また、運休については、行くと、輸送力が落ちるために、乗客の損失という観点では、有効ではないという結果が得られた。しかし、ダイヤ乱れを早く収束させる事ができる。

#### 6.2 今後の課題

##### (1) 運転整理案実行可能までの時間を考慮した運転整理

本論文では、事故発生と同時に事故の状況や運転整理案の作成、整理案の現場社員や乗客への情報提供ができることを前提に運転整理を行っている。しかし、現実の問題として、これらを瞬時にやること

## 第6章 結論

は不可能である。先行研究<sup>[8][9]</sup>においては、事故直後から運転整理案作成中は、暫定運行計画による運行が提案されており、片方向においてどのような暫定運行計画がよいか検証されている。上下両方向においてどのような暫定運行計画がよいか研究する必要がある。

### (2) 運転整理案適用中に復旧時刻が変わったときの運転整理

現場の状況によっては、予測していた復旧時刻に復旧できないことがある。このような事態になったときにどのように運転整理を行うか、また、復旧時刻が変更になることも想定して運転整理を行うか研究する必要がある。

### (3) 複数線区に対応した運転整理システム

都市部の鉄道は、網目状に路線があり、相互で乗換ができる等、とても便利である。また、現在の運行管理システムは複数線区を扱うものもある。よって、運転整理を複数の線区でかつ乗り換える乗客についても扱える必要がある。

### (4) 最適な運転整理

今回、運転整理の適用順序を固定にしている。運転整理手法は、互いに影響を及ぼすため、順序の固定は最適な運転整理でなくしている可能性がある。また、運行順序変更においては乗客視点の評価を用いておらず、今回用いた乗客視点での評価値が最小となる保証はない。評価値を最小とするような研究は不十分であり、行う必要がある。

### (5) 振替・代行輸送の考慮

大都市においては、複数の路線が並行していたり、並行していないまでも他の手段で目的地まで行ける環境であったりする。よって、ある路線が止まっても、復旧を待つのではなく、振替輸送や代行輸送を使って、他の方法で目的地を目指す乗客が存在することが考えられる。これらの乗客を正しく評価することで、本システムより実態に合った乗客流解析が実現できる。

## 謝辞

本研究を遂行にあたり、多くの方々から多大なるご支援、ご協力を賜りました。ここに感謝の意を表したいと思います。

指導教員の古関隆章准教授には修士課程の2年間、研究の進め方を懇切丁寧に指導頂きました。また、学会発表や各種行事に参加させて頂き、非常に貴重な経験をさせていただきました。本当にありがとうございました。

曾根悟東京大学名誉教授、千葉工業大学の富井規雄教授、工学院大学の高木亮准教授、上智大学の宮武昌史准教授には運転整理共同研究打ち合わせで研究に対する助言や情報の提供をいただき大変お世話になりました。各大学の学生の皆様とは、運転整理学生WGや共同勉強合宿において活発な議論を行い、研究を進める上で大変役立ちました。共同研究打合せの場においては、JR西日本の泉利幸様、井関一隆様、中根秀起様、杉田憲亮様、鉄道総合技術研究所の後藤浩一様、福村直登様、坂口隆様、中村達也様、平井力様には、鉄道事業者や鉄道の専門家からご指導頂きました。特に中根秀起様には、列車の運行や運転整理に関する貴重な資料や説明を提供して頂きました。また、指令所見学で現在の指令所を把握する機会を設けて頂いたことなど、多大なるご支援を頂きました。

運転整理共同研究の先輩である鉄道総合技術研究所の熊澤一将様、田中峻一様には、研究経験の浅い私に懇切丁寧に研究の指導をして頂きました。特に、田中峻一様とは、1年間研究室で一緒に、楽しい研究室生活を送ることができました。共同研究で2年間一緒にやってきた千種健二君には、研究の議論を深めることができました。お互い、切磋琢磨できたのではないかと考えております。共同研究で一緒にやってきた後輩の渡辺央朗君は、私の力不足よりの的確な助言もできずご迷惑をおかけした事もあるかと思いますが、一部会議の取りまとめを手伝って頂き、ありがとうございました。

福正博之さんには博士課程としていつも研究室をまとめてくださり、日々の研究室生活を楽しく過ごすことができました。研究室生活の中でいろいろご指導をいただき本当にお世話になりました。Genevieve Marie Pattersonさんには、海外の文化を教えて頂きありがとうございました。

同期の早山和弥君、杉本貴大君、佐藤功一君には、研究に対する議論を共に行ったり、いろいろな話をしたりし、楽しい研究室生活を送ることができました。後輩の申重變君、川上千幸君、迫健太郎君、原崇史君、中村太一君には、いつも研究室の雑用をしてもらい、ありがとうございました。

技術職員の高田康宏さんには研究室内の研究環境の整備だけでなく、いろいろな知識を教えて頂き、とても勉強になりました。秘書の松崎由香子さんには、出張の際の事務手続きでお世話になるだけでなく、研究室に明るさをもたらして頂き、ありがとうございました。

最後に、大学院における研究生生活を支えてくれた家族に感謝の意を表し、謝辞と致します。

平成23年2月9日

福地正樹

## 参考文献

- [1]東海旅客鉄道：「JR 東海・環境報告書 2010」（2010 年）
- [2]国土交通省：「鉄軌道輸送の安全にかかわる情報（平成 21 年度）」（2010 年）
- [3]（財）鉄道総合技術研究所運転システム研究室：「鉄道のスケジューリングアルゴリズム コンピュータで運行計画をつくる」, NTS（2005 年）
- [4] 富井規雄：「ダイヤ乱れに強い運行管理システムをめざして」, 平成 21 年度電気学会産業応用部門大会, 3-S13-1（2009 年）
- [5] Y. Nagasaki, M. Eguchi, T. Koseki : 「Automatic Generation and Evaluation of Urban Railway Rescheduling Plan」, International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems, pp.301-306（2003）
- [6] 長崎祐作：「乗客行動推定機能を持った運転整理支援システム」, 修士論文, 東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻（2004 年）
- [7] 原和弘：「列車運行乱れ時の因果律を考慮した乗客流推定に基づく運転整理システムにおける整理案の効率的評価・適用法」, 修士論文, 東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻（2008 年）
- [8] 熊澤一将：「列車運行乱れを解消する計画作成時間を考慮した方向別複数線における運転整理」, 修士論文, 東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻（2009 年）
- [9] 田中峻一：「複数経路を考慮した乗客流推定に基づく運転整理支援システムにおける暫定運行計画の運用法」, 修士論文, 東京大学大学院情報理工学研究科電子情報学専攻（2010 年）
- [10]（株）電気車研究会鉄道図書刊行会：「鉄道ピクトリアル 2003 年 1 月臨時増刊号【特集】近畿日本鉄道」（2003 年）
- [11] 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）
- [12] 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）
- [13] 電気鉄道ハンドブック編集委員会編：「電気鉄道ハンドブック」, コロナ社（2007 年）
- [14] S. Tanaka, K. Kumazawa, T. Koseki : 「PASSENGER FLOW ANALYSIS FOR TRAIN RESCHEDULING AND ITS EVALUTION」, International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2009（STECH' 09）（2009）
- [15] 家田仁、赤松隆、高木淳、畠中秀人：「利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価」, 土木計画学研究・論文集 No.6, pp.177-184（1988 年）
- [16] 列車ダイヤ研究会：「列車ダイヤと運行管理」, 成山堂書店（2008 年）
- [17] 金子敏夫、大嶋薫、太田国男：「営団丸ノ内線列車群管理システム」, 第 30 回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, No.315（1993 年）
- [18] Kazuhiro Hara, Kazumasa Kumazawa, Takafumi Koseki : 「Efficient Algorithm for Evaluating and Optimizing Train reschedules by Taking Advantage of Flexibility of Quadruple Track」, The third International Conference on Railway Traction System（RTS2007）, 5-4, pp.91-97（2007）

[19]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）。

[20]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）。

[21]電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会編：「鉄道ダイヤ回復の技術」，オーム社（2010年）

## 発表文献

1. 福地正樹\*，古関隆章：「複々線区間における折り返しを考慮した列車運行シミュレーションと乗客流解析」，電気学会交通・電気鉄道研究会 TER-10-049（2010年）

2. 福地正樹\*，古関隆章：「高密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」，電気学会電気鉄道・ITS合同研究会 TER-10-058・ITS-10-049（2010年）

3. 福地正樹\*，古関隆章：「高密度運行の複々線区間における上り下りの干渉を考慮した運転整理」，第17回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2010），S5-2-5，pp.519-523（2010年）

4. 福地正樹\*，古関隆章：「高密度運行の複々線区間における列車順序変更法の提案」，電気学会全国大会（2011年）（予定）

共著

Shunichi TANAKA, Chigusa KENJI\*, Masaki FUKUCHI, Takafumi KOSEKI：「METHOD TO GENERATE AND CLASSIFY TENTATIVE TRAIN SCHEDULE FOR KEEPING THE TIME TO SEARCH AN OPTICAL PLAN IN COMPUTER-AIDED TRAIN RESCHEDULING」，The 12th World Conference on Transport Research（WCTR2010）（2010）

代理発表

Takafumi KOSEKI, Daisuke SAKURAI, Masaki FUKUCHI\*, and Takeomi SUZUKI：「Multiple Rate Sampling State Estimation for a Visual State Feedback Control of a Linear Synchronous Motor」，7th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, PS 2.5, pp.141-144（2009）