

— 修士論文 —

列車運行乱れを解消する
計画作成時間を考慮した
方向別複々線における運転整理

Train rescheduling considering time for planning
strategies for recovery from irregular operation
on direction quadruple tracks

平成 21 年 02 月 04 日提出

指導教官 古関 隆章 准教授

東京大学大学院 工学系研究科 電気工学専攻

学籍番号 37-076411

熊澤 一将

内容梗概

鉄道において列車の運行が乱れたとき、運転整理業務が行われる。現在、この業務は指令員によって行われているが、ダイヤ変更や評価に関する明確な指標がなく経験に頼る部分が多い。このため、列車運行の高速・高密度化に対応して迅速かつ確かな運転整理を行うためには、計算機による支援が強く望まれている。先行研究より、乗客の立場からダイヤの定量的な評価を行い、それに基づいて適切なダイヤ変更手段を選択する運転整理案作成支援システムの作成を行っている。

先行研究までのモデルでは障害発生時刻において瞬時に運転整理案を作成・実施するという仮定をおいていた。本研究では、より現実に即した評価指標を導出するために、運行障害情報の伝達・把握や運転整理案作成時間を考慮した乗客流推定法を提案する。これによって、より現実的な運転整理案の作成が可能になった。

Abstract

Train rescheduling during disrupted service is a substantially significant task for urban railway operators. This task typically depends on the experiences and personal decisions of the professional operators. The operators use neither systematic methodologies for modifying train schedules nor quantitative criteria for measuring the quality of the rescheduled plans. Thus, operators have requested assistance in the form of a computer-aided train-rescheduling program. The authors have created a computer-aided train rescheduling system that seeks to minimize passenger inconvenience. The rescheduling algorithm calculates a value for the amount of inconvenience experienced by the passenger.

The proposed rescheduling method also introduces the idea that the time required to create, broadcast, and implement a new plan of operation is itself a delay which must be accounted for in order to render a realistic passenger flow analysis during disordered operation. Ultimately, the passenger flow analysis discussed in this paper is a tool for evaluating the causality of train system events after the initial event that caused the disruption of service. The author asserts that their modification results in a more realistic evaluation of the passenger flow.

目次	
第1章 序論	1
1.1. 研究の背景	1
1.2. 研究の目的	2
1.3. 本論文の構成	3
第2章 運転整理計算機支援システムの概要	4
2.1. 運転整理支援システムの構成	4
2.2. 乗客の視点からみた整理案の評価	5
2.3. 異常時における運転整理手法	8
2.4. 列車運行シミュレーションの概要	12
2.5. 乗客行動シミュレーションの概要	15
第3章 運転整理案作成時における時系列事象の考慮	18
3.1. 異常時における因果律を考慮した乗客流推定	18
3.2. 運転整理案作成時における時系列事象	19
3.3. まとめ	20
第4章 整理案作成時間を考慮した乗客流推定	21
4.1. 運転整理案作成時間の考慮	21
4.2. 運転整理案作成時間の考慮による影響	26
4.3. 暫定運行計画による影響	30
4.4. まとめ	37
第5章 方向別複々線の特長を生かす整理手法とその適用の考え方	38
5.1. 複々線区間における運転整理手法	38
5.2. 異常時における運転線路変更	39
5.3. 自由な状況下の運転線路変更	40
5.4. 設備条件による運転整理への影響	43
5.5. まとめ	52
第6章 結論	53
6.1. まとめ	53
6.2. 今後の課題	54

謝辞	55
参考文献	57
発表文献	58
付録 評価ツールとしての乗客流解析	59

第1章

序論

1.1. 研究の背景

鉄道は他の交通機関に比べて、エネルギー特性、土地利用効率、資源問題、安全性などの特性が目立って優れている、といわれている。エネルギー特性を自動車と比較した場合、本質的には走行抵抗が少ないことと、電力回生ブレーキを代表とするブレーキ時のエネルギー回収が可能という構造上の利点がある。また、土地利用についても東海道新幹線と東名・名神高速道路との比較では、用地幅当たりの輸送量は新幹線の方が7倍程度あり、高速道が夜間に貨物輸送に使われていることを考慮しても鉄道の優位性は明白である。

このように多くの利点を持つ鉄道は、利用者の時間とその信頼性に関しても、他の交通機関とかなり異なる特性を示す。他の交通の多くは輸送具のみを所有する多数の事業者または個人がそれぞれの意思で運行しようとするために、さまざまな問題が生じる。このため、他の交通機関においては完全な交通制御を行い、輸送時間や信頼性を保つことはできない。それに対して、鉄道は線路、車両、運行のすべてを一元的に管理・運営できる完結したシステムである。そのため、運行制御を行うことによって、正確な輸送時間や信頼性を実現することができる。その反面、鉄道車両は一次元的な鉄道軌道上しか移動できないため、多くの制約条件が存在する。

日本の鉄道は、前述の制約条件を考慮した考慮した緻密なダイヤによって、各列車の運行が遂行されている。そのため、多くの制約条件下における高密度かつ高信頼性の輸送サービスの提供能力は世界随一と言っても過言ではない。事実、東海道新幹線の平成15年度の平均遅延時分は0.1秒であり、在来線においてもおおむね1分程度である。

このように、高い信頼性及び定時性をもって知られている日本の鉄道であるが、事故や天災、車両故障などの発生によってダイヤが大きく乱れることがある。図1.1に示すように、平成17年度にはJRと民鉄合わせて857件の運転事故と5201件の輸送障害が発生している。運転事故とは、衝突や脱線、踏切事故や人身事故などの事故、輸送障害とは、30分以上列車が遅れたときや列車の運休があったときのことをいう。このようにダイヤが乱れたときには、列車の運行を正常に戻すために、一連のダイヤの変更が行なわれる。列車のダイヤを適切に変更する作業を運転整理と呼ぶ。

緻密に計画されたダイヤで運行されている鉄道を、輸送障害の発生から通常ダイヤに回復させるのは非常に困難となる。現在、運転整理の作業は指令員によって人手で行なわれている。運転整理を実行するためには、列車や車両の在線位置、線路配置、乗務員の所在や乗客需要などさまざまな条件を考慮する必要がある。また、実際の状況が不確定な中でも適切な判断を迅速に下さなければならない。しかし、適切にダイヤを変更するための明確なアルゴリズムや、変更されたダイヤを評価するための指標が確立されていない。そのため、指令員の勘と経験に頼って運転整理を行っているため、大きな負担となっている。このため、指令員の運転整理案作成業務を支援するシステムが必要とされている。

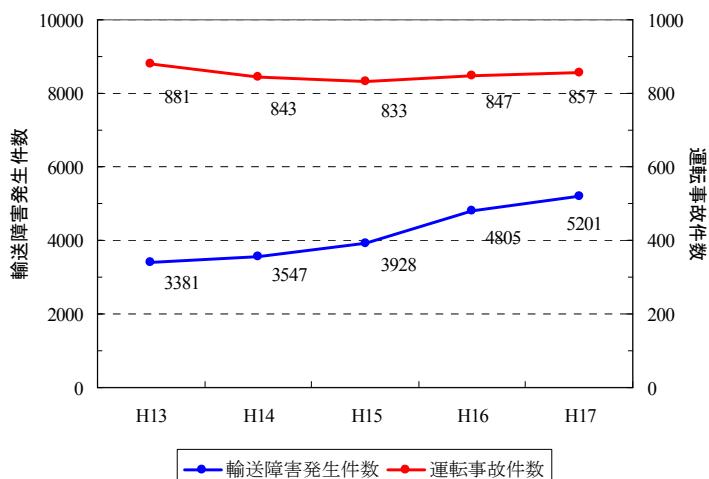


図 1.1 日本における鉄道障害の件数

1.2. 研究の目的

先行研究^{[5] [6]}より、運転整理の完全な自動化は非常に困難であることから、運転整理業務を行う指令員を支援するシステムの開発を行ってきた。また、作成された運転整理案を評価する方法として、列車ダイヤを乗客の視点から定量的に評価する手法が用いられている^[7]。これまでの研究において、列車運行が乱れた際に計算機が適切なダイヤ変更を行うアルゴリズムと組み合わせることで、運転整理案を提案するシステムの開発が行われている。そのうえで、本研究においては自由度も高く適用可能な運転整理手法の多い方向別複々線区間を対象とした研究を行っている。

先行研究においては、計画ダイヤ時における乗客流推定のみを使用していたため、乗客が障害情報をあらかじめ知っていたかのような行動をとっていた。原の研究^[8]において、乗客流推定に用いるダイヤを計画時と整理案適用時との2つに分割することによって、この問題が解決されることが示された。しかし、先の解決策において、運転整理が行われる場合に発生する事象をすべて障害発生時刻に集約する、という仮定をおいていた。つまり、先行研究においては、障害が発生したと同時に復旧時刻が判明し、瞬時にその後の整理案が作成され、また乗客への情報伝達も障害発生時刻に行なわれていた。実際は、運転整理案を作成・施行するまでの時間を考慮する必要性が生じてくる。本研究ではこの仮定を緩和し、運転整理案の作成時間を考慮したアルゴリズムを提案する。新たに正常時と本格的な運転整理案適用時の間に、障害発生直後に抑止を行う整理案を明示的に挿入する。具体的には障害発生時刻と運転整理ダイヤ開始時の2箇所での運行のシナリオを分割し、その2箇所間に適用する抑止のみを考慮した暫定運行計画を作成・挿入する。これによって、整理案作成・実施までの時間を表現する。

また、先に述べた運転整理案の作成時間を考慮したシステムでは、複々線区間の特性を生かした運転整理手法は適用されていなかった。ここで、作成する運転整理案の部分に、原の研究^[8]において効果が実証されている運転線路変更を追加したシステムを提案する。さらに、このシステムによって運転線路変更の適用判断についての検証を行う。

以上の点を考慮することによって、運転計算機支援システムのための実用的評価システムの完成度を高めることを、本研究の目的とする。

1.3. 本論文の構成

本論文は6つの章によって構成されている。以下に、第2章以降の構成について述べる。

まず、第2章においては、先行研究から引き継いでいる運転整理支援システムの構成について述べる。第3章においては、先行研究の運転整理支援システムの改善すべき点を述べ、さらに本研究において検討を行う事項について述べる。第4章においては、第3章で述べた事項の1つである運転整理案の作成及び実行に要する時間を考慮した乗客流計算のシステムについて述べる。また、第4章で提案したシステムのモデル路線への適用とそれを通じた機能の検証を行う。この際、ケーススタディを行うために用いるモデル路線とその特徴について述べる。第5章では、第4章で提案した運転整理案の作成時間を考慮したシステムに加えて、先行研究では考慮されていなかった複々線区間特有の運転整理手法である運線路変更の機能を付加する。そして、その効果を検証する。これにより、複々線区間における運転整理手法の適用基準を論じる。最後に、第6章において本研究のまとめと今後の課題を記す。

第2章

運転整理計算機支援システムの概要

本章では、本研究で作成している運転整理計算機支援システムの概要について述べる。まず、運転整理計算機支援システム全体の構成を説明する。さらに、本システムにおける評価の基準を述べ、運転整理案の作成と評価の方法を説明する。

2.1. 運転整理支援システムの構成

本研究で作成している運転整理支援システムは、列車ダイヤの作成とダイヤの評価という2つの部分から構成されている。列車ダイヤの作成部分においては、列車の遅延情報をもとにして待避駅の変更や時隔調整などの運転整理手法をダイヤに適用し運転整理案を生成する。例えば待避駅変更の場合は、待避列車が遅延した通過列車を待つ時間が閾値を超えている個所があれば待避を先延ばしする案を生成し、また、通過列車が遅延した待避列車に追いついてその時隔が閾値を下回っている個所があれば待避を前倒しする案を生成するなどの処理を行う。これにより生成された運転整理案に従って列車を運行した場合の列車運行シミュレーションを行い、各列車の各駅における着発時刻を決定する。

ダイヤの評価は、目的駅までの所要時間や乗換、混雑による乗客の損失の量を評価値として用いて行う。列車運行シミュレーションにおいて判明した各駅の着発時刻をもとにして、乗客の流動を推定する。

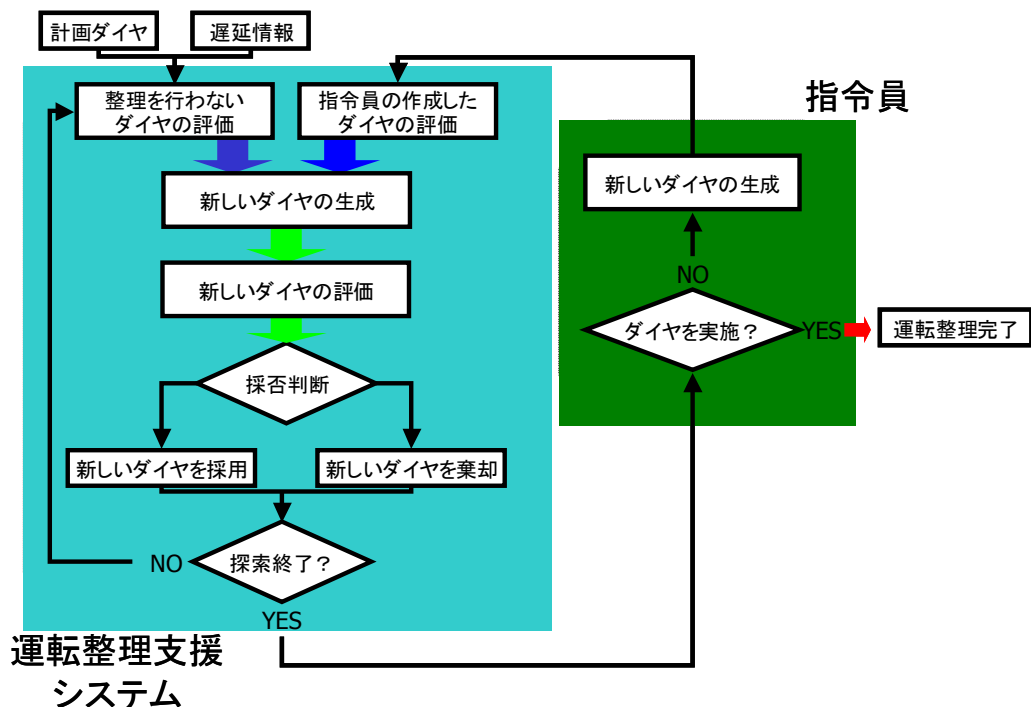


図 2.1 運転整理支援システムの構成

これをもとに、新しいダイヤ案の採否判定を行う処理を繰り返すことにより整理案を作成する。そして、その整理案を指令員に提案する図 2.1 に示すような構成となっている。

以下に、本システムにおけるダイヤの比較基準となる乗客の視点から見た整理案の評価について概念を述べる。その後、運転整理案作成部分を構成する運転整理手法の適用と列車運行シミュレーション、運転整理案評価部分を構成する乗客行動シミュレーションについて詳述する。

2.2. 乗客の視点から見た整理案の評価

運転整理案を評価する上で、その評価基準となる指標が重要になる。これまで、鉄道事業者において全列車の遅延時間の総和が小さいほどよい整理案であるという方法がよく用いられてきた^[6]。この方法は簡便であり、迅速に運転整理案および列車運行の評価値を算出することができる。しかし、この評価指標を用いた場合、列車運行のみ注目してしまうために鉄道の利用者である乗客の観点が反映されない。したがって、前述の指標で良い整理案と評価されたものでも、実際に乗客の立場から考えると良いとは言いがたい。そこで、本研究では乗客の視点から見た整理案の評価を行うことを主張する。以下に、従来の総遅延時間による整理案の評価と乗客の視点から見た整理案の評価の具体的計算法を詳述する。

2.2.1. 総遅延時間による整理案の評価

整理案の評価には従来から、列車の遅延時分を全て合計した総遅延時間を算出し、その時間が小さいほど良いとする方法がよく用いられてきた。その評価式を(2.1)式に示す。

$$D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T'_{ij} - T_{ij}) \quad (2.1)$$

n : 全駅数

m : 全列車数

T_{ij} : 列車 j の駅 i の出発予定時刻

T'_{ij} : 列車 j の駅 i の実際の出発時刻

この方法では、実際の運行ダイヤと計画ダイヤを与えることによって迅速に評価値の計算を行うことができる。計画ダイヤの場合、総遅延時間 D は 0 となる。そのため、作成された運転整理案の総遅延時間 D が 0 に近いほどその整理案はよいものと判定される。しかし、この方法では列車の運休による効果を測定できない。つまり、(2.1)式では全列車の遅延時間の総和を計算しているため、図 2.2 に示すように遅れている範囲の列車を運休にしてしまえば評価値である D は小さくなり良い整理案である

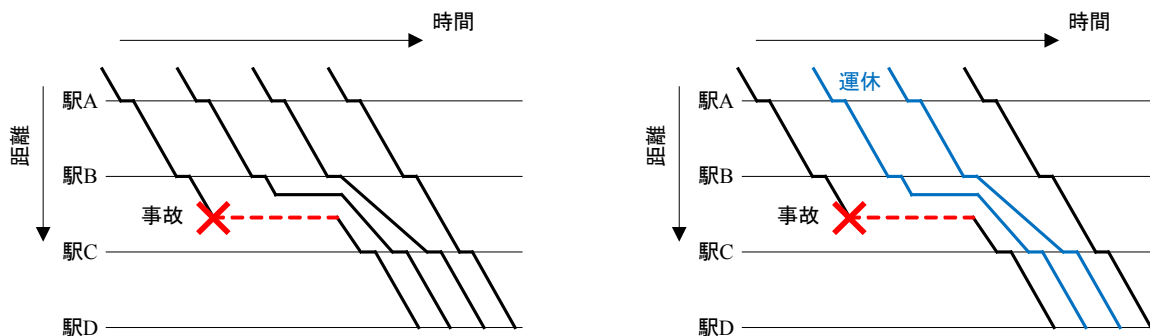


図 2.2 総遅延時間による評価による整理案

と判断されてしまう。実際には、列車を運休したことによって各駅において列車を待つ乗客が増加してしまい、運転再開直後の列車の混雑度が著しく上昇してしまうなどの問題が発生する。特に都市部においては、乗客数が多いため混雑度の上昇が各駅における乗降時間の増大を副次的に招く可能性が高く、作成された整理案が増延などによって実施できないこともある。

2.2.2. 乗客の視点から見た整理案の評価

本研究では、2.2.1 で紹介した手法に対して乗客の視点から見た整理案の評価手法を提案している。この手法では、後に示す乗客行動シミュレーションを用いて乗客の動きを推定し、乗客の受ける損失の総和を評価値とする。この評価値が小さいほどよい整理案であると判断する。乗客の受ける損失としては、所要時間、乗換、列車の混雑度の3つを考えることとする。これらはそれぞれ次元が異なる量である。そのため、それぞれの損失を時間換算した値の総和を作成された運転整理案の評価値とする。列車が正常に運行されている計画ダイヤであっても、各乗客について所要時間や乗換、列車の混雑は発生しているため、評価値は0ではない。乗客損失の小さい整理案ほどよい案であると判断する。

(1) 所要時間

各乗客における所要時間は出発駅に到着してから、目的駅に到着するまでに要する時間である。この項目は乗客が最も重視するものであり、評価値の中でも主要な割合を占める。本システムにおける所要時間は、すべての乗客における所要時間を合計したものを示す。整理案全体の所要時間の損失 L_1 は(2.2)式で示される。

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

N : 全体の乗客者数(人)

t_i : 乗客 i が出発駅から目的駅に到達するまでの所要時間(秒)

(2) 乗換

列車の乗換は、実際に移動に要する時間以上に乗客に不満を与える要素となる。例えば、同一ホームにおける乗換と跨線橋など渡って移動しなくてはならない乗換とでは、乗客の負担が異なる。そのため、本システムでは移動の所要時間に加えて負担も損失として評価値に反映させる。1回の乗換における乗客それぞれの負担の時間換算値を各駅で乗換元と乗換先ホームごとにデータとしてここで与える。そして、その総和 L_2 を乗換損失として (2.3)式を用いて求める。

$$L_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} r_{ij} \quad (2.3)$$

N : 全体の乗客者数(人)

M_i : 乗客 i の乗換回数(回)

r_{ij} : 乗客 i の j 回目の乗換換算値(秒)

表 2.1 混雑に対する人間の感覚の非線形性を表す係数

混雑度 R(%)	f_c (係数)
0~100	0.00027R
100~150	0.000828R-0.0558
150~200	0.00179R-0.2
200~250	0.0069R-1.22

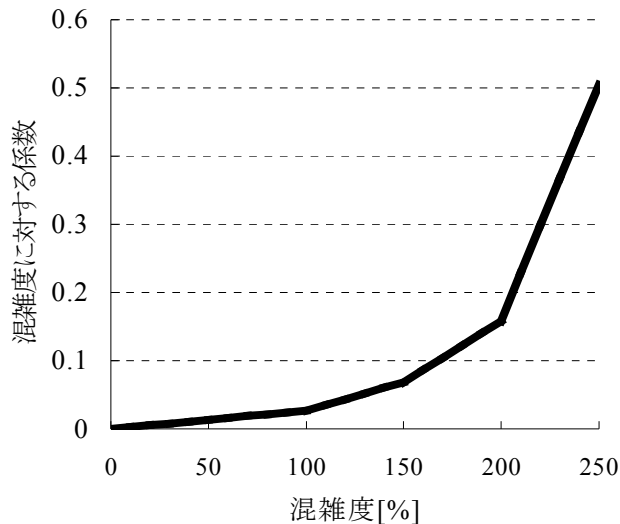


図 2.3 混雑に対する人間の感覚の非線形性を表す係数

(3) 列車の混雑度

列車の混雑は乗客のストレスや疲労の原因となる。そのため、整理案を評価していく上で混雑度も損失として評価する必要がある^[9]。列車の混雑による乗客の不満はすいているときは著しく少なく、逆に乗客が非常に多くなると急激に上昇するという非線形性がある^[10]。混雑度の評価は、混雑時に対して人間が1分あたりどれだけ長く感じるかを時間に換算する非線形の係数を用いて行う。その非線形性を持つペナルティ係数の概形を表 2.1 と図 2.3 に示す。混雑度 L_3 はその係数 f_c に対して、混雑を被った乗客数 q_{ks} (人) とその時間 t_{ks} (秒) をかけあわせることによって求められる。その式を (2.4) 式に示す。

$$L_3 = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=1}^{S_k} f_c \left(\frac{q_{ks}}{c_{ks}} \right) q_{ks} t_{ks} \quad (2.4)$$

n : 駅数

S_k : 駅 k に到着する列車本数(本)

f_c : 混雑度に対する人間の感覚の非線形を示した関数

c_{ks} : 駅 k に s 番目に到着する列車の乗車定員(人)

q_{ks} : 駅 k に s 番目に到着する列車のその駅までの乗客数(人)

t_{ks} : 駅 k に s 番目に到着する列車のその駅までの所要時間(秒)

(4) 整理案の評価値

(1)~(3)までに述べた3種類の損失を合計した値が、作成した整理案の評価値となる。(2.5)式に整理案の評価値 L を示す。単位は(人・秒)である。

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (2.5)$$

2.3. 異常時における運転整理手法

本研究で作成している運転整理支援システムでは、列車の遅延情報をもとにしてさまざまな運転整理手法を用いることによってより評価値の良いダイヤ案を作成する。次節で詳説する列車運行シミュレーションを行う前に、適用する運転整理手法が決定される。

以下に示すのは、実際に運転整理の場面において用いられている運転整理手法である。

(1) 抑止

実際に列車の運行が停止した時、まず行われるのがこの抑止である。運行障害が発生した時に列車が駅間で停車してしまう状態が発生する。この状況を機外停止という。機外停止が発生すると、乗客は列車のままで閉じ込められた状態になり、他の交通機関への移動の不可や密閉された車内への閉じ込めによる乗客の不満の増大など大きな問題が発生する。また、列車の停車位置によっては踏切の長時間封鎖など他の交通機関への影響も発生する。そのため、機外停止はできるだけ避けなくてはならない。このようなとき、障害発生箇所周辺の列車を手前の駅で停車させておく抑止が適用される。図2.4に示すのが抑止適用前後のダイヤを示す。図2.4(a)は障害発生した後に抑止を適用せず機外停止が発生してしまった場合、図2.4(b)は抑止を適用することによって機外停止を回避した場合である。ここでは、抑止は各列車の次の停車駅で行われているが、通常は運転再開後の列車運行も考慮して行われる。

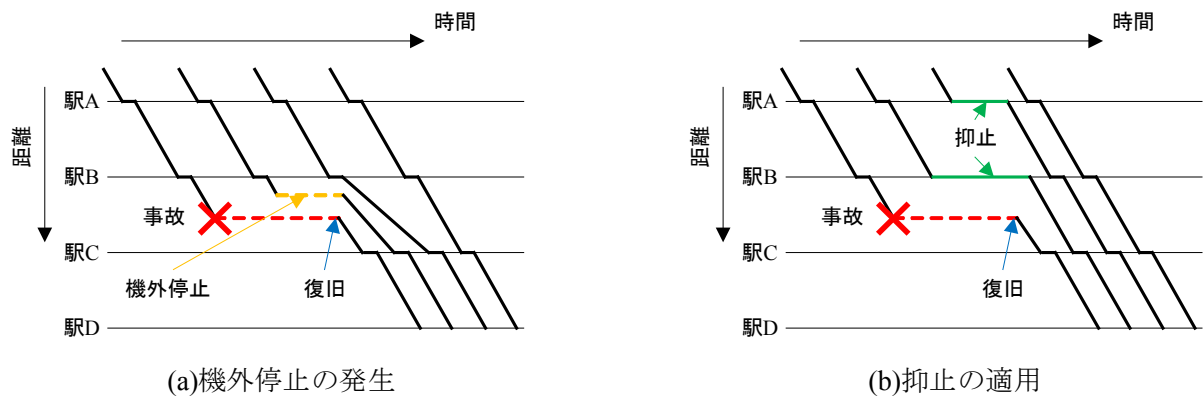


図 2.4 抑止

(2) 時隔調整

都市部などの列車が高密度で運転されている路線では、乗客は一般に時刻表を見ずに駅にやってきて、次に来る電車に乗るという行動を取っていると考えられる。こうした路線においては、各列車に乗車する乗客の数は前列車との間隔で決定される。ここで何らかの原因である列車の遅延が発生すると、前列車との間隔が拡大する。それによって、遅延発生直後の列車には各駅に滞留していた乗客が集中するために乗降時間が増し、さらに列車が遅れるという悪循環に入ってしまうことがある。また、このような路線では列車の間隔が均一であることの方が各列車の定時運行より大事であることが多い。

このような状況を防ぐため、遅延が発生した列車より先行している列車を故意に遅らせて列車の等間隔性を保ち、乗客を分散させて全体として早期に正常ダイヤへの収束を図る。手法という「時隔調整」という。図2.4に時隔調整適用前後のダイヤを示す。

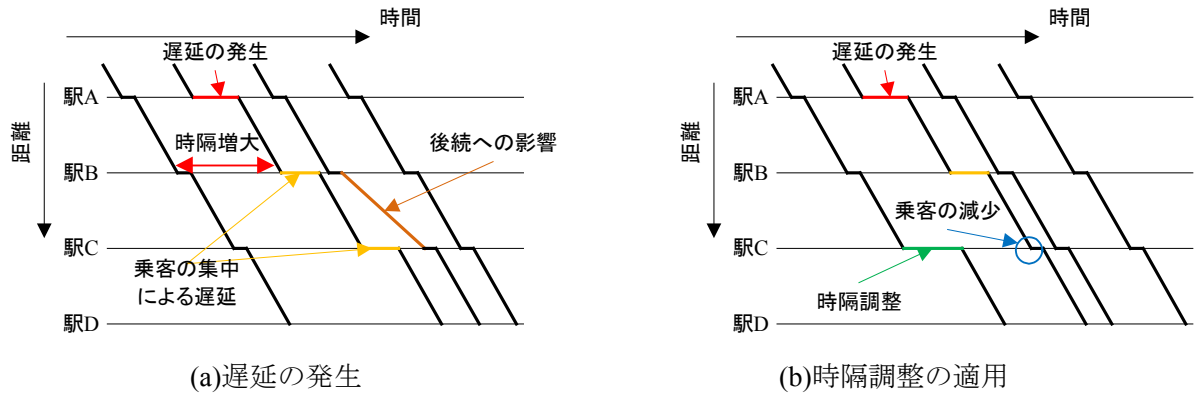


図 2.4 時隔調整

(3) 待避変更

急行列車が先行する普通列車を追い抜く時、先行する普通列車は駅において待機して追い抜かれる。このような列車の待ち合わせが待避であり、あらかじめダイヤ上でどの駅でどの列車がどの列車を待避するのか綿密に決められている。しかし列車に遅延が生じている時には、当初の計画どおりに待避を実行すると遅延が他の列車に波及してしまう。このため、遅延の波及を避けるために待避を実施する駅を変更する。これを待避変更と呼ぶ。ここで、図2.5に待避変更の例を示す。

計画ダイヤ(a)においては、駅Aにおいて普通列車が急行列車通過のために待避を行っている。ここで、急行列車に遅延が発生して(b)に示すダイヤになった場合、駅Aにおいて急行列車の待避を行う普通列車にも大きな影響を与える。そこで、駅Aでの普通列車の待避をやめ、普通列車が急行列車通過の待避を行う駅を駅Bに変更したものが(c)のダイヤである。この場合、急行列車遅延による普通列車への影響を抑えることができる。

この待避変更を行う場合には対象駅における待避設備の有無や、その待避線の長さなどにも注意が必要である。上記の例では、駅Bにおいても待避設備が存在する必要がある。もともと待避関係に無かった列車に新たに待避を設定することや、逆に待避を解消して終着駅まで列車の順序が入れ替わらないようにすることも、待避変更の一種である。

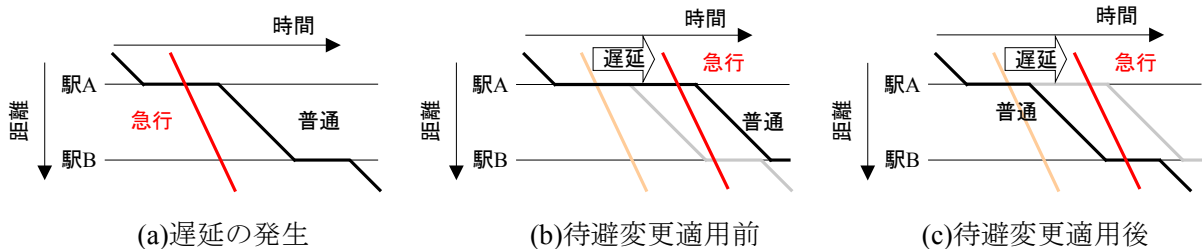


図 2.5 待避変更

(4) 着発線変更

運行障害発生時に、列車が接続を行う駅において、列車が使用する着発線を変更する場合がある。この場合に適用されている運転整理手法を、着発線変更と呼ぶ。図 2.6 にその様子を示す。この手法は、複数の着発線を持つ駅が対象となるため、前述の待避変更とともにこの着発線変更が適用されることが多くある。また、列車走行する線路が複数ある区間においては、異なる線路を走行し同じ番線を使用する列車に及ぼす影響を抑えるために着発線変更を行う場合がある。着発線変更を行う際は、ホームで並んで待つ乗客のために早期の案内が必要である。

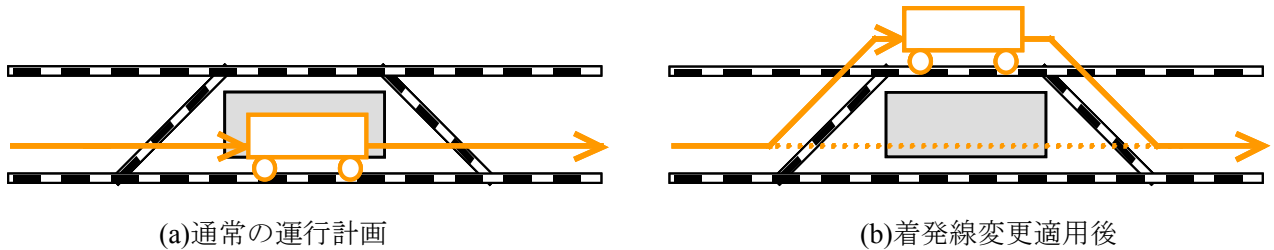


図 2.6 着発線変更

(5) 運転線路変更

複々線や単線並列の区間では、駅間で走行可能な線路が複数存在している。また、走行可能な線路間においても、相互に移動可能な渡り線が設置されている場合が多い。列車が走行する線路はあらかじめダイヤで決められている。しかし、障害発生により本来走行する線路が不通になってしまった場合や、運行の乱れによって多数の列車が特定の線路に集中してしまった場合には駅間で走行する線路を変更することがある。これを運転線路変更と呼び、図 2.7 にその様子を示す。本来、快速列車は内側線を走行しているが、この場合は先行の普通列車の事故の影響を回避するため、一時的に外側線を走行している。

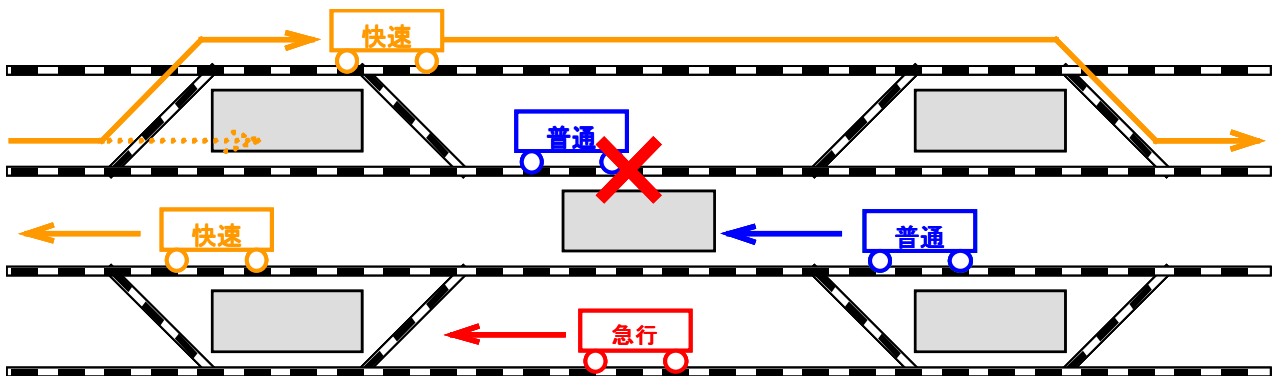


図 2.7 運転線路変更

(6) 番線使用順序変更

図 2.8 に示すように、各駅における各列車が番線を使用する順序は、あらかじめダイヤによって綿密に計画されている。しかし、図 2.9(b)に示すように列車運行に障害が発生した場合には、計画された列車順序のまま運行すると後続列車へ大きな影響を与えることがある。そこで、本来計画されている番線の

使用順序を変更することで、後続列車への遅延の波及を抑えるために行われるのが番線使用順序変更である。実際に、番線使用順序変更を適用した結果を図 2.9(c)に示す。先に述べた列車の運行順序が変更される待避変更や運転線路変更でも、この番線使用順序変更が同時に行われる。

また、図 2.8 に示すように複々線区間では異なる線路を走行する列車が、同じ番線を使用することがある。一方の線路の遅延を他方の線路へ及ぼさないために、異なる線路を使用する列車間の順序を変更する場合がある。図 2.9 に示す例では普通列車と急行列車は別の線路を走行しているが、駅 B では同一の番線を使用する。急行列車が遅延した場合、普通列車が急行列車の出発を待つこととなり普通列車にも遅れが生じてしまうが、図 2.9(c)に示すように番線使用順序変更を行うことでその影響を抑えることが可能となる。

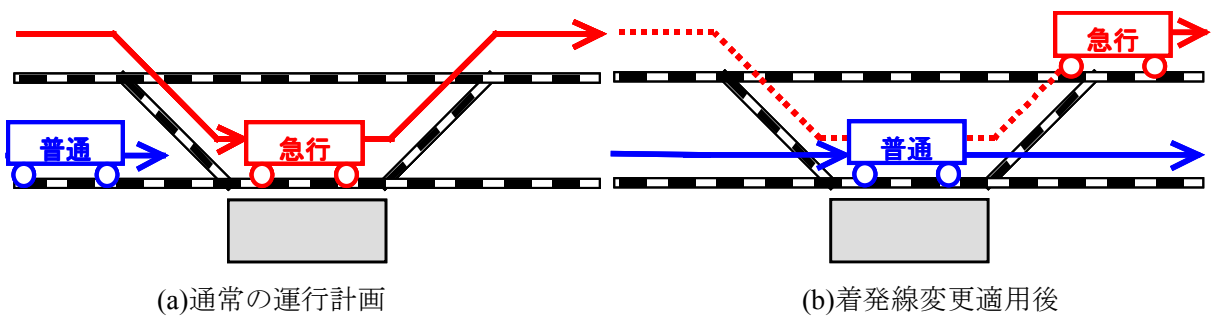


図 2.8 駅 B における通常の運行時における番線使用順序

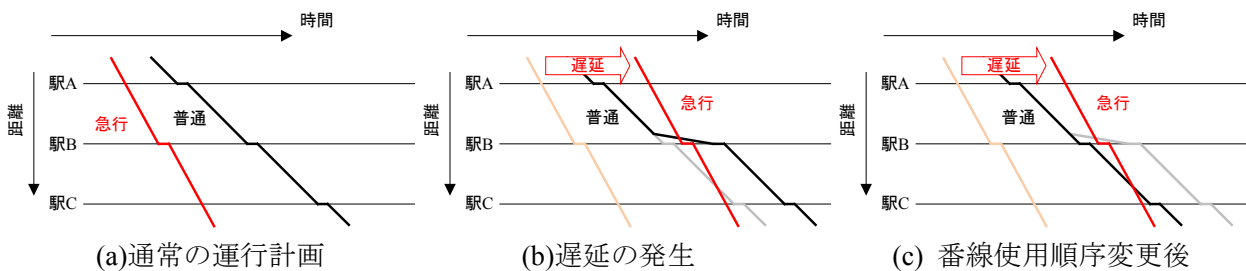


図 2.9 番線使用順序変更

(7) 運休・打ち切り

運休・打ち切りとは、列車の運行を取り止めたり、途中駅で運転を打ち切る運転整理手法である。これらは、混乱しているダイヤの早期回復を図る上で非常に有効な手段である。しかし、輸送力を減らすことになり、各列車間の運転間隔が大きくなり、運休を行った後の列車における混雑を招くなど乗客に迷惑をかけてしまう。そのため、朝夕のラッシュ時間帯に使用されることはあまりなく、日中の多少列車を運休・打ち切りしても十分な輸送力を確保できる時間帯に運行障害が発生した場合に、夕ラッシュまでに正常ダイヤに戻す目的で使用されることが多い。

打ち切り列車の折り返し部分を併せて運転を取りやめ、区間運休と引き替えに正常化を図る手法を「山切り」と呼び、打ち切り列車と同時間帯の逆方向の列車を区間運休する手法を「たすき切り」と呼ぶ。この2つの手法は、次に述べる特発とともに適用されることが多い。「たすき切り」の例を図 2.10 に示す。

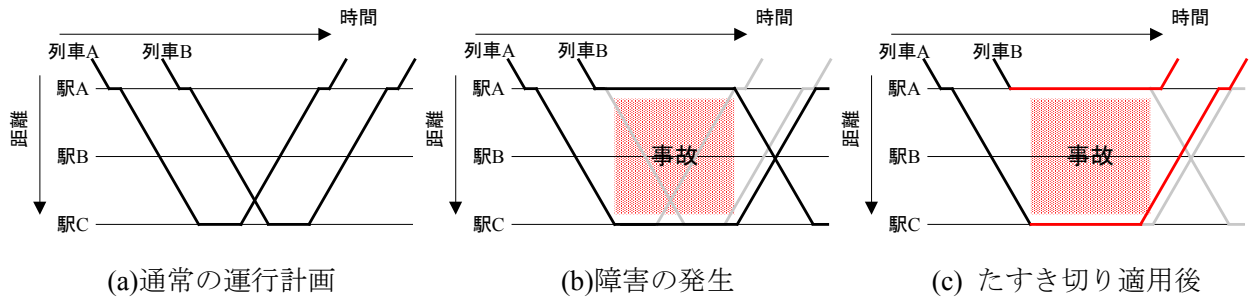


図 2.10 たすき切り

(8) 特発

運転再開直後など輸送力が不足し乗客をさばくことができない場合に、臨時列車を設定し輸送力の増強を図る手法が特発である。車両の手配とともに乗務員の確保も必要である。

(9) 臨時停車

障害発生や各種運転整理手法適用による変更の結果として、急行列車などの優等列車はやってくるが、普通列車の間隔が大きく開いてしまうといった状況が起こりうる。優等列車通過駅では長時間停車する列車が到着しないため、その駅に向かう乗客やその駅から乗車する乗客に大きな時間損失を与えることになる。そのため、本来優等列車が通過する駅に臨時に列車を停車させることで乗客の救済を図る手法のことを臨時停車という。しかし、複々線区間など急行線と緩行線が分かれている場合には、運行する線路によってホームに柵がある場合や、ホーム自体がない場合がある。臨時停車を行う際には、このような駅の設備も考慮する必要がある。

(10) 列車種別変更

列車の種別を変更する運転整理手法である。急行列車を緩行列車にする「格下げ」と緩行列車を急行列車にする「格上げ」が考えられるが、現在は乗客への案内が困難という理由から格上げは行われていない。格下げは運転再開直後の誤乗車トラブルを防ぐためや、各駅の乗車機会を確保する目的で実施される。

2.4. 列車運行シミュレーションの概要

列車を運行する上では、多くの制約条件が存在する。列車運行シミュレーションでは、そのすべての制約条件を満たした最短の着発時刻を決定しなくてはならない^[11]。本研究は、列車の運行を図 2.9 で示すようなグラフ構造で表現している。ノードは、それぞれの列車の各駅における到着時刻と発車時刻を示している。リンクは各ノード間の走行・停車と、下記の制約条件を表現している。

(1) 計画ダイヤ

各駅における列車の到着・出発・通過の時刻は、あらかじめ計画ダイヤによって定められている。一般的に障害が発生すると列車の運行は計画ダイヤよりも遅れることになるが、状況によっては早く運行できる場合がある。しかし、列車の運転時刻は鉄道の運行に関わる様々な作業の基盤であり、より早い運転が可能であっても計画ダイヤは守らなくてはならない。特に、ある列車が計画ダイヤよりも早く出発すると、その列車に乗る予定であった乗客が乗り遅れてしまうなどの問題が発生し、乗客に迷惑をかけることとなる。

計画ダイヤよりも早く運転しないという制約は、基準となる時刻を表すノードから各列車の到着・出発ノードへ有向リンクを張ることであらわされる。このとき、リンクの重みは計画ダイヤにおける出

発・到着時刻と基準になる時刻の差をあらわしている。

(2)基準運転時分

基準運転時分とは車両形式や両数、その駅の停車・通過や使用する着発線ごとに、その駅間を走行するために必要な最小時分を示したものである。列車が運行にするにあたって、路線設備による速度制限や、車両に最高速度や加速度といったものが変化してくる。基準運転時分は、このような状況を含めたうえで、それ以上速く駅間を走行できないという制約を示す。

基準運転時分の制約は、各列車のある駅における出発ノードから次の駅における到着ノードに有向リンクを張ることで表される。リンクの重みには、基準運転時分の値を設定する。

(3)最小停車時分

最小停車時分は駅での乗降に最低限必要な時間を表したものである。列車が駅に停車する場合、必ずこの時間以上停まらなくてはならない。この制約は各列車のある駅における到着ノードから、その駅の出発ノードへ張られる有向リンクによって表現される。このリンクの重みが最小停車時分の値である。また、列車が駅を通過する場合には重み0のリンクが張られる。

(4)列車運行順序

列車が駅間を運行する順序はダイヤによってあらかじめ定められており、この順序関係を制約として表現する。ある列車の到着・出発ノードから次の列車の到着・出発ノードへ有効リンクが張られる。そのリンクの重みは、その線路へ駅から出発する列車間、またはその線路から駅に到着する列車間で空けなければならない必要な最低限の時間である。

(5)閉塞

通常、鉄道には閉塞と呼ばれるシステムが導入されている。閉塞とは、線路を一定の区間に分割し、1つの区間には同時に2本以上の列車を進入させないというものである。これは、信号保安システムの制約により、ある駅間には、その駅間に存在する閉塞区間の数より多い列車本数は同時には進入できないことを意味している。

列車運行シミュレーションでは、駅間線路を同時に走行できる列車の本数を制限することで閉塞システムを近似的に表現している。つまり、駅間のある線路に同時に走行可能な列車数が最大 n 本であるときは、到着ノードから n 本後の列車の出発ノードへ有向リンクが張られる。

(6)時隔制約

列車はポイントによりいくつかの進路を取り得るが、それぞれの進路、または進路間には先行列車が進入したあと、一定の時間が経たないと次の列車は進入できないという制約が存在する。つまり、走行する線路に競合が発生しないようにするための制約である。これを時隔制約という。その間隔はポイントの切り替えに要する時間や、列車の加減速に要する時間、安全上の観点から続行して走行できる時間などから決まり、リンクの重みもその時間となる。列車運行順序の制約も、続行間隔を示している点から時隔制約の一種と考えることができる。

列車は、上記のすべての制約条件を満たした上で運行されなければならない。列車が一番早く運転した場合の着発時刻は、基準時刻を表すノードから各ノードまでの最長経路を PERT (Program Evaluation and Review Technique) というグラフ理論の最長経路探索で使用される手法を用いて探索することにより、その経路長として得ることができる。ダイヤが変更されると制約条件も様々に変化するので、変更内容を反映するようにグラフのノードやリンクの作成、削除、変更が行われる。本システムによって作成される列車運行グラフの例を図 2.10 に示す。

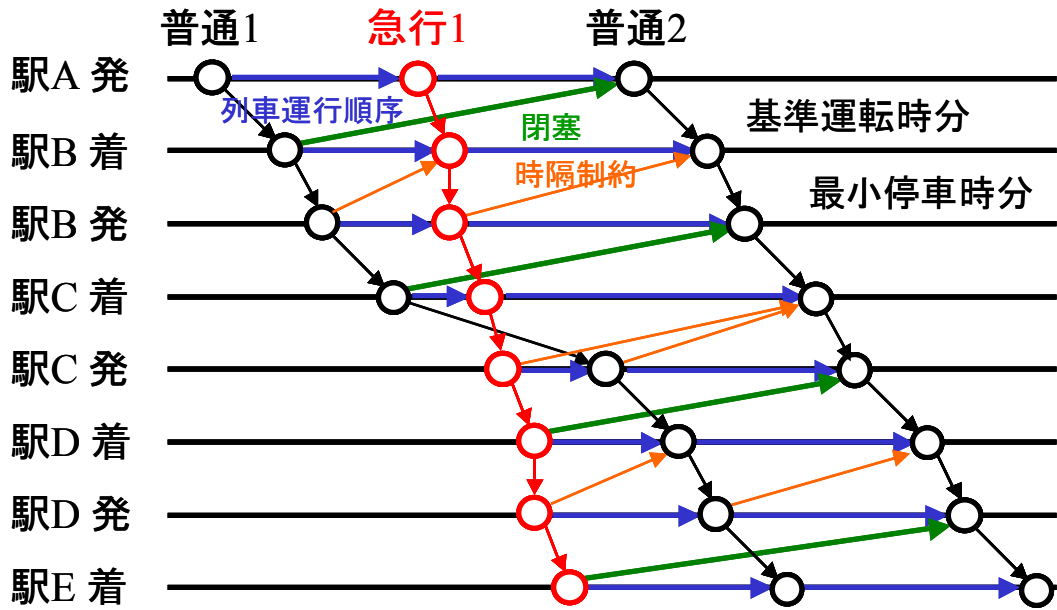


図 2.9 列車運行シミュレーションのためのグラフ

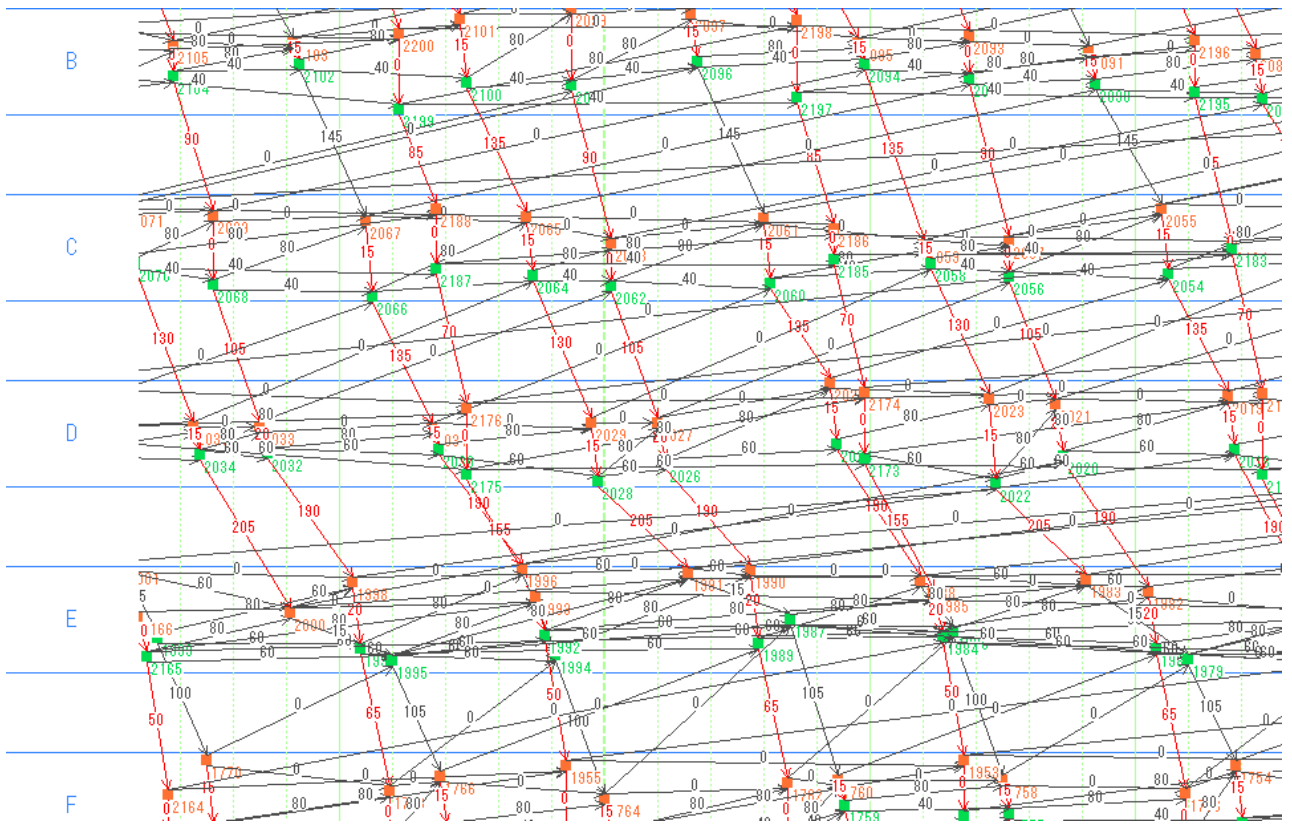


図 2.10 列車運行シミュレーションの実行例

2.5. 乗客行動シミュレーションの概要

2.2節で述べた評価方法を用いて、2.4節で作成された列車ダイヤを評価するには、各列車における乗客数の推定を行わなくてはならない。そこで必要となるのが、乗客数を推定する乗客行動シミュレーションである。本システムでは、各乗客は所要時間による損失および乗換による損失の和を最小にし、また乗換における待ち時間を最小にする経路を選択するものと仮定する。現実の乗客がこのように行動するためには、列車の運転時刻や接続などその路線に関するあらゆる情報を把握していなければならない。特に列車運行が乱れた状況ではこのようなことは不可能に近いが、移動体通信技術を用いた旅客案内システムの開発が進められているので、ここでは近い将来乗客は必要な情報を得ることが可能になると考える。さらに、都市近郊においては、普段から列車を使用する乗客が多く、各乗客はある程度の情報を知っているものと仮定することもできる。

また本システムでは、2種類の乗客行動モデルを仮定している。

- (1)モデル1：同一の出発駅から同一の目的駅へ移動する乗客は、出発駅に均等な間隔で出現する。出発駅で列車を待つ時間も所要時間に含まれる。
- (2)モデル2：同一の出発駅から同一の目的駅へ移動する乗客は、目的駅へ着くべき時刻が均等な間隔で指定される。目的駅で列車を降りる時刻から指定された時刻までの時間も所要時間に含まれる。

モデル1は、都市近郊鉄道における乗客のうち大半を占めている乗客行動モデルと考えられる。このモデルは、時刻表を見ずに出発駅にやってくる乗客をあらわしている。モデル2は、長距離鉄道の乗客や運行頻度の少ない路線でよく見られる乗客行動モデルである。このモデルは、あらかじめ時刻表で乗車する列車を決めてから列車の時刻に合わせて出発駅にやってくる乗客を表現している。

本研究で対象とする路線は都市近郊区間であり、また列車運行乱れ時には乗客は目的駅に早く到着することを優先すると考えられる。そこで、以降はモデル1の乗客行動仮定を中心に扱う。

また、本システムにおいては時間軸上での均一な乗客の出現、消失を仮定している。通常こうしたシミュレーションを行う時には、ポアソン分布にしたがって乗客が出現または消失するようにモデルを設定することが多い。しかし、ポアソン分布は、乗客の出現率が十分高い場合は均一出現に近づく。そのため、本研究では計算や入力データ作成の省力化も考慮して均一出現モデルを採用した。

先に述べた乗客行動モデルに基づき各乗客の乗車する路線・列車を決定するためには、各乗客に対して所要時間と乗換の損失が最小となる経路を求める必要がある。本システムでは、乗客の選択する経路を、図2.10に示すようなグラフ構造を利用して求める。

ここで用いるグラフは、各乗客が移動可能な経路を示している。列車運行シミュレーションより、各列車の停車駅ごとに到着と出発を表すノードが作成される。出発ノードからは、その列車の次の停車駅における到着ノードへ乗車リンクが張られる。これはその列車に乗車し、駅間を移動する乗客流を示す。また、到着ノードからはその駅の出発ノードへ停車リンクが張られる。これは、乗車を継続するために停車中の列車内にいる乗客流を示す。さらに、その駅において乗換可能な列車の到着ノード・出発ノード間には乗換を表すリンクも生成される。乗車リンク・停車リンクには重みとしてその所要時間が、乗換リンクには重みとして乗換所要時間、乗換待ち時間に乗換による負担を時間換算した値を加えたものが割り当てられる。本システムで作成される乗客行動グラフの例を図2.11に示す。

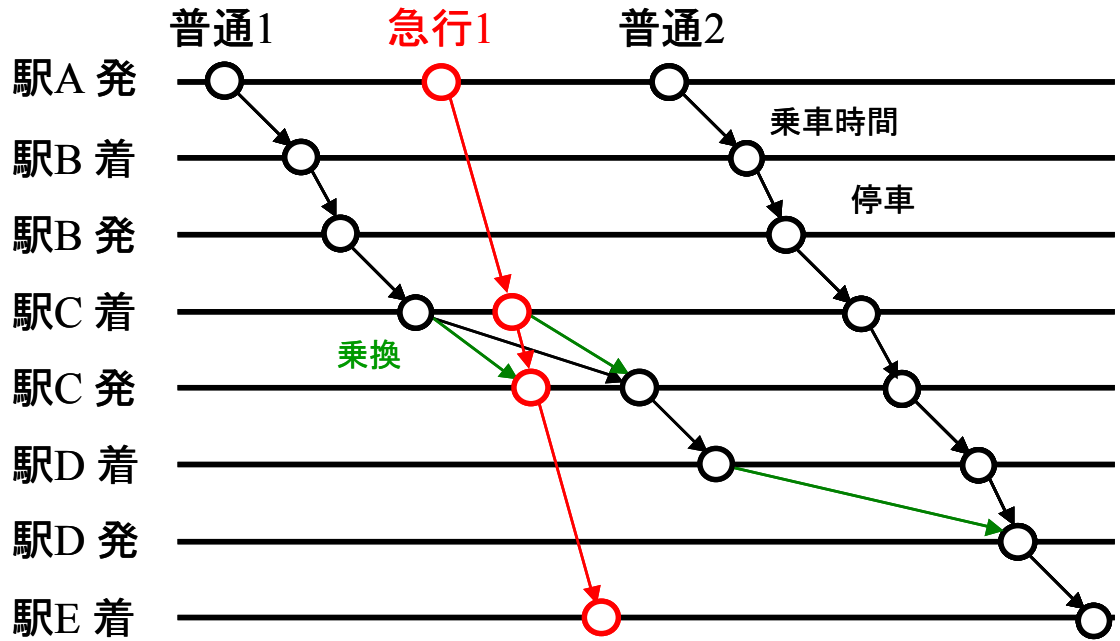


図 2.11 乗客行動シミュレーションのためのグラフ

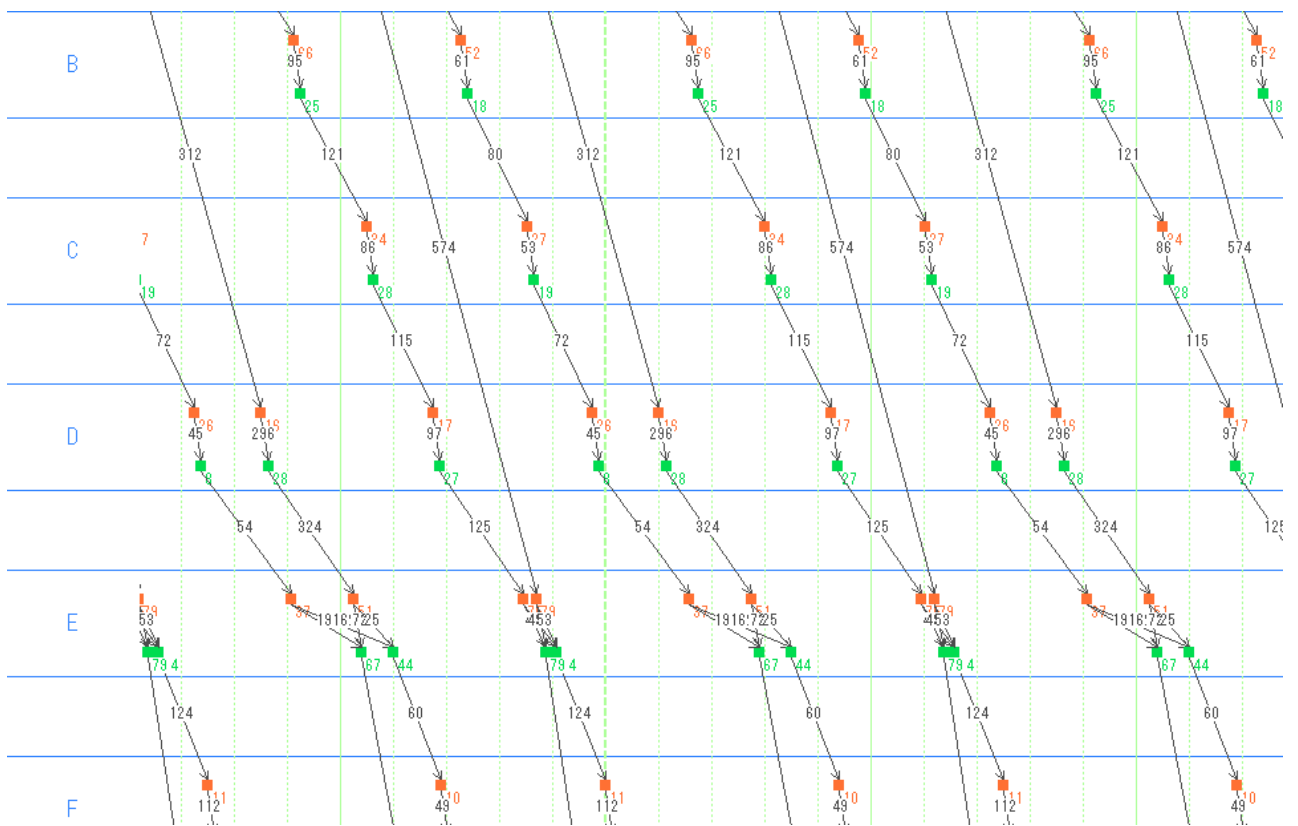


図 2.12 乗客行動シミュレーションの実行例

グラフ表現により、上記のモデルの乗客1は、経路上におけるリンクの重みの合計を最小にする経路をとることになる。故に、この経路の探索は最短経路問題に帰着される。最短経路探索にはダイクストラ法を用いる。ダイクストラ法によって求められる経路は、ある出発ノードから見る限りは必ず最短経路であるが、他の出発ノードからの経路と比較した場合に有効な経路でない場合がある。そのため、出発駅を先に出る経路よりも後に出る経路の目的駅到着時刻が早い場合、また先発経路と後発経路の目的駅到着時刻が同じ場合で先発経路の乗換損失が後発経路の乗換損失よりも大きい場合には、先発経路を削除するという処理を行う。このようにして作成された経路に、OD データを基に乗客を割り付けることで各列車の乗客数を推定する。

最終的に、この乗客行動シミュレーションにおける乗客数の推定後に、2.3 節で用いた評価項目をもとに、作成された整理案の評価値を算出する。本システムでは、グラフ理論を用いた乗客流推定により、高速で各列車における乗客数を推定することができる。また、同時に乗客の視点からみた整理案の評価値の算出できる。本システムを改良することによって、外部で作成された運転整理案における乗客流と評価値を迅速に評価、及び出力することもできる。その一例を付録で詳述する。

第3章

運転整理案作成時における時系列事象の考慮

本章では、先行研究^{[6][8]}より作成している運転整理案作成支援システムにおける特徴を示す。さらに、先のシステムに存在する問題点を併記する。

3.1. 異常時における因果律を考慮した乗客流推定

先行研究^[8]においては、乗客が事故発生直後のダイヤを知った行動を取ってしまうという問題点の解決がなされた。ここでは、事故発生時刻に運転整理案が作成・実行されるという仮定のもとで、障害発生による列車運転乱れ時においても計画ダイヤ時と同じ乗客行動推定法を用いていた場合、乗客が障害発生時刻前から障害である発生によるダイヤ変更を予見したかのような行動をとってしまう問題に対する解決法を提案したい。

例えば、図 3.1(a)に示すように駅 C において急行列車と普通列車が接続するダイヤがあったとする。この場合、駅 A から駅 D に向かう乗客は、時刻 $0 \sim s$ に現れた場合であっても後発の急行を選択する。ここで、時刻 u において急行に障害が発生したダイヤ(b)を考える。駅 C においての待避を解除している状態になっている。このとき、事故発生情報が伝わるのは時刻 u 以降であるので、時刻 $0 \sim s$ に発生した駅 A から駅 E へ向かう乗客は急行を選択するのが正しい。しかし、これまでは計画ダイヤから障害発生直後までを 1 つのダイヤとして表現していたため、時刻 0 の時点において時刻 u で発生する運行障害を知った状態で乗客が行動してしまう。つまり、駅 A から駅 D へ向かう乗客は急行ではなく、急行の障害が発生したことによって駅 D に先着することになった普通を選択することになる。これは、未来を予見した乗客行動となり、現実には即した乗客流推定方法にする必要がある。

この問題を解決するため、先行研究^[8]においては正常時と障害発生後 2 枚のダイヤを用いることで、列車運転乱れ時における乗客行動を正しくモデル化する手法が提案された。先までの問題の根底には、シミュレーション開始時点で乗客が N_0 から N_{x+1} に発生する出来事をすべて知っているとの仮定が暗黙のうちにおかれてしまっているという問題がある。これによって、乗客が障害発生によって到着が遅くなる列車をあらかじめ避けるといった行動をとってしまい、正しい乗客流推定ができなかった。そこで先行研究^[8]の提案では、現実に近いモデルとするため、乗客は障害が発生するまでは計画ダイヤ通りに列車が運行されるものと仮定して行動を決定し、障害が発生しその情報を得た段階で改めてどのように行動すればよいか再決定するものとした。図 3.2 に挙げるように、運転整理時には様々な業務が時間差をおいて行われるが、先行研究^[8]では障害発生後の事象は全て N_0 に実施されると仮定する。先行研究^[8]では、この仮定の下で先に述べたように 2 枚のダイヤを用いた乗客流推定を行うことによって、障害発生時の正しい乗客流推定を可能にした。

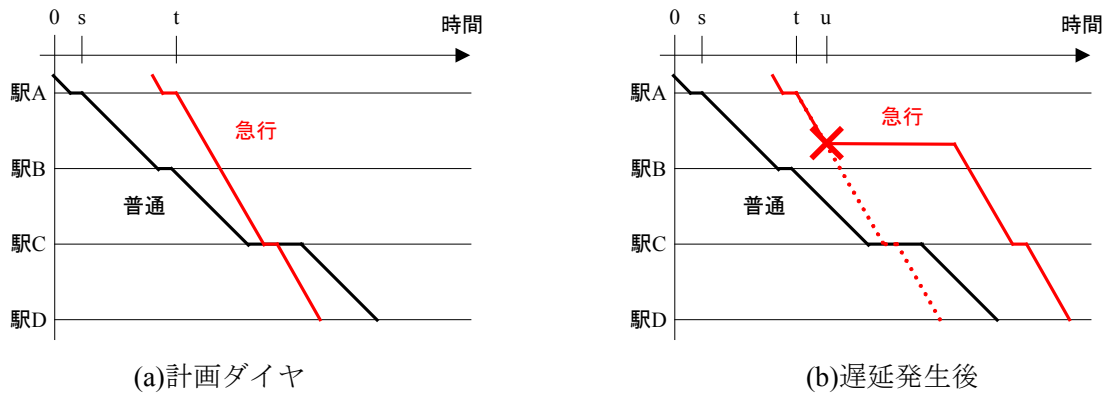


図 3.1 列車運行乱れ時の乗客流推定の問題点

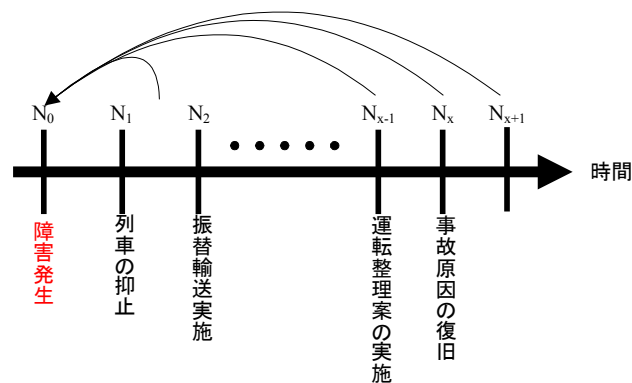


図 3.2 列車運行に乱れ時に施す各手順

3.2. 運転整理案作成時における時系列事象

ここでは、前節で述べた先行研究^[8]において存在した問題点について述べる。そして、その問題点を改良することによって、新たに発生する課題を挙げる。

3.2.1. 運転整理案作成時間の考慮

列車運行乱れ時の乗客流推定法として前節で提案されたモデルでは、障害が発生すると同時に復旧時刻が正確に判明し、瞬時に運転整理案作成、乗客への情報伝達が行なわれると仮定されていた。この方法により、乗客があらかじめ事故が発生することを予見していたかのような行動をする解析上の問題は回避できた。しかし、乗客流解析としての仮定の現実性にはまだ問題点が残った。実際には、列車運行乱れが発生した直後から情報判明や各種整理業務は時間を追って行われる。そこで、先行研究^[8]において提案した分割を一度行う方法を拡張し、複数回分割することで、状況が段階的に変化していく様子を乗客流解析に反映させることが望ましい。この場合、乗客は各時点で与えられた運行譲歩に基づき列車が運行されると仮定して行動決定し、逐次新たな情報を得た段階で改めてどのように行動すればよいかを再決定するものとする。

前節でも述べた通り、運転整理時には様々な事象が時間差をおいて発生するが、これまでのシステムでは図 3.2 で示すように障害発生後の事象は全て N_0 に実施されると仮定している。すなわち、障害が発生すると、それと同時に復旧時刻が正確に判明し、それらの情報が指令室に伝えられ運転整理案が作成

される。そして、ダイヤ変更に関する情報が直ちに全乗客に伝えられるとの仮定が暗黙のうちにおかれている。この解析法に基づく運転整理支援システムでは運転整理の計画や情報伝達などに必要な時間を無視した形で整理案が作成されてしまう。

そこで、4章においてこれまでのシステムの拡張を行い、これまで障害発生時刻に集約されていた事象の再考を行う。すなわち、本研究では運転整理案が作成されるまでの時間をひとまとまりとして、整理案作成に要する時間に相当するダイヤを挿入する。これによって、今まで1分割であったダイヤを2分割へと拡張する。そして、モデル路線においてその効果を検討する。

3.2.2 方向別複々線区間への拡張

先行研究^[8]により、複々線区間から複々線区間に拡張した運転整理の研究検討が行われてきた。それによって、これまでの複々線区間に比べてより多くの運転整理手法の適用可能性が出てきた。先行研究^[8]では、この複々線の特長を生かした運転整理手法を適用した運転整理案作成システムが提案されている。本論文では、前項で述べた運転整理案作成時間を考慮した乗客流推定プログラムを用いて、方向別複々線区間で運転整理手法を追加した影響を検討する。運転整理案作成時間を考慮すると列車運行が止まっている時間が長くなり、整理案適用後の列車運行密度が著しく高くなるのが容易に考えられる。この場合、列車運行密度が高い状況下で運転整理手法の効果も変化する。本研究では、モデル路線を用いて、施設条件を変化させたとき、運転整理手法の有効性変化の検討も行う。

方向別複々線とは、複々線のうちで以下のような線路配置のものを示す。この複々線方式では、普通列車など主に下位種別の列車が走行する線路を緩行線、特急列車など主に上位種別の列車が走行する線路を急行線と呼ぶ。方向別複々線では、同方向の2本の線路が並べて敷かれているので、乗客にとっては同一ホームで異種別列車の乗換ができ便利で、運転指令員にとっては急行線と緩行線間に設置された渡り線を活用することで様々な整理手法を適用できる柔軟性を持つという特長がある。

3.3. まとめ

本章では、これまでの研究における問題点を列挙した。その上で、以下に示す2点について本論文で手法の提案と検討を行う。

先行研究^[8]において、事故を予見した乗客流推定を回避するために正常時と障害発生時の2つのダイヤを用いた。しかし、この手法では図3.2に示すように障害発生時において存在する多くの事象を障害発生時刻に集約するという仮定をおいていた。すなわち、その仮定のもとでは逐次行われる運転整理の時間的経過を無視した乗客流解析になる問題が残った。その解決手法として、本章では運転整理案作成時間を考慮した乗客流推定を提案した。

また、上記問題を解決し運転整理案作成時間を考慮できるようにしたことで、複々線区間において列車運行密度が顕著に高くなった状況下での各種運転整理手法の具体的検討が可能になった。列車運行が高くなった状況下で、設備条件等を考慮した運転整理手法の効果を検討する必要がある。そこで、上記の各条件の下で検討を行う。

第4章

運転整理案作成時間を考慮した乗客流推定

本章では、運転整理案作成及び実行に要する時間を考慮した運転整理支援システムの提案について記述する。

4.1. 運転整理案作成時間の考慮

前章で述べたように先行研究^[8]において、障害発生を予見しない乗客流動推定法として正常時と障害発生後2つのダイヤを用いることによって解決する手法が提案された。しかし、この手法では乗客流動推定法として障害が発生したと同時に復旧時刻が判明し、瞬時にその後の整理案が作成され、また乗客への情報伝達も障害発生時刻に行われるという仮定をおいている。しかし、実際は障害発生から乗客が運転整理ダイヤを知るまでに多くの事象が存在する。このため、上記の仮定の下で乗客流推定を行い、それに基づく評価指標を計算しても、現実との乖離が大きくなってしまうと考えられる。

本節では、この問題点を解決するために新たに運転整理案作成時間を考慮したモデルの提案を行う。それにより、より現実に近い運転整理案作成支援システムを作成する。以下、先に示したシステムの作成について詳述する。

4.1.1. 運転整理案作成・実行時に考慮すべき事象

列車運行に障害が発生した場合に行われる運転整理には、さまざまな手順が存在する。その具体的な例としては、次のようなものが挙げられる。

(1) 障害状況の把握と復旧時刻の予測

障害が発生した時に、その復旧時刻を予測して、それがダイヤにどの程度の影響を及ぼしそうかについて推定する。例えば、踏切事故なら、すぐに運転を再開できそうなのか、それとも、クレーンなどの重機が必要で復旧まで長い時間を要するのかなどの事情を確認する。

(2) 関係列車の抑止

障害の規模がある程度大きく、機外停止したままの列車が存在してしまうなどの状態が発生する場合には、後続の列車を直近の駅に抑止することが試みられる。これは、列車が駅間に停止（機外停止）した状態となり車内の乗客に多大な迷惑がかかることを防ぐためである。運転を優先的に確保したい列車がある場合は、その進路を確保できるように抑止箇所を決定する。また、障害の規模が大きい場合、始発駅などで列車を抑止することも多い。

(3) 運転整理案の方針の決定

復旧までにある程度の時間がかかると予測される場合、運転整理の基本方針を立てることが重要となる。これは、「列車の遅延を何時頃までに収束させるか」、「そのために何本くらいの列車を運休するか」ということとほぼ同義である。本研究の具体的検討は、列車運行密度が高くない昼間の時間帯を対象としている。この場合、夕方のラッシュ時間帯までに遅延を解消することが重要な方針となる。

(4) 運転整理案の作成

障害状況と復旧時刻の予測、基本方針を踏まえ、具体的に運転整理案を作成する。本研究の対象が数理的最適化ではなく、マンマシンインターフェースを重視する支援というシステムの位置づけから、基本的な考え方として、第2章で示した人間がこれまでに行ってきた個別のダイヤ変更の内容を組み合わせ、その選択と適用順序を決定していく。現在の運転整理業務の現場では、運行管理システムから個々の列車の運行情報を把握し、それをもとに将来の運行を予測しながら、なるべく乗客に迷惑をかけないような運転整理案を作成している。

(5) 運転整理案の伝達

作成した運転整理案を関係者に伝達する。関係者には、駅員、乗務員、車両基地、乗務員基地、関係する線区の指令員などが含まれる。運転整理案の伝達については、新幹線では運行管理システムに入力されたダイヤ変更情報を自動的に区所などの端末に伝達するシステムが実現されている。しかし、JR 在来線では、運転整理案の伝達は、今でも主として、ファックスなどで行われている。車上の運転士には、列車無線を使うこともある。本システムでは、一般的な路線を対象としているため、JR 在来線と同様の状況の広い適用対象を持つシステムを前提する。そのため、この情報伝達作業に要する時間も無視することはできない。

(6) 乗客への伝達

運転整理の実施にあたっては、運転整理案の作成と同様に、あるいは、それ以上に、乗客や利用者への情報伝達が重要になる。次に来る列車の案内、先着列車の案内、振替輸送の案内などが必要とされる。駅や車内の乗客に対する案内は、駅員や車掌による放送が中心となる。

(7) 振替輸送の実施

大都市近郊の鉄道網においては、列車の密度が非常に高いうえに各列車の乗客数も非常に多い。このような状況下では、列車運行障害が発生するとターミナル駅を中心に多くの乗客は滞留して、非常に大きな混乱が発生する。この場合に、他社間の鉄道網を用いて乗客を救済する振替輸送が実施される。この振替輸送を行う際には、鉄道事業者各社間の連絡・手配が必要となる。

以上に述べた事象の流れを時間的に示したのが、図 4.2 になる。3 章でも述べた通り先行研究^{[8][12]}における運転整理案作成システムにおいては、すべての事象を障害発生時刻に集約させていた。実際に先行研究^{[8][12]}で作成されたシステムによって、運転整理を行った結果が図 4.2 に示すものである。しかし、上記の通り、実際に運転整理案が多くの事象が存在することは明白である。より現実的なシステムを作成するうえでは、各々一定の時間を要する各事象の時系列を考慮する必要がある。

本研究では、これらの事象を個別に考慮するかわりに、もっとも効率的な近似として、従来障害発生時刻のみで分割されていたダイヤを、さらにもう 1 分割することを試みる。具体的には、運転乱れ発生時点と本格的な運転整理案を開始する時刻の間に暫定整理案を明示的に乗客流推定の中に挿入する。

このために、3 章で述べた先行研究^{[8][12]}で提案された列車運転乱れ時の乗客流動推定アルゴリズムを拡張する。先行研究^{[8][12]}における乗客流動推定法は列車運転乱れ時における乗客行動を適切にモデル化するために、正常時と障害発生後の 2 つの運行計画を用いている。本研究では、その拡張として運転乱れ発生時点と本格的な運転整理案を開始する時刻の間に、暫定整理案を新たに挿入する。すなわち、障害発生時刻と運転整理ダイヤ開始時の 2 箇所で行うシナリオを分割し、その 2 時点の間に施行する抑止のみを考慮した暫定運行計画を作成・挿入する。これによって、より現実的な整理案の検討を行えることが期待される。

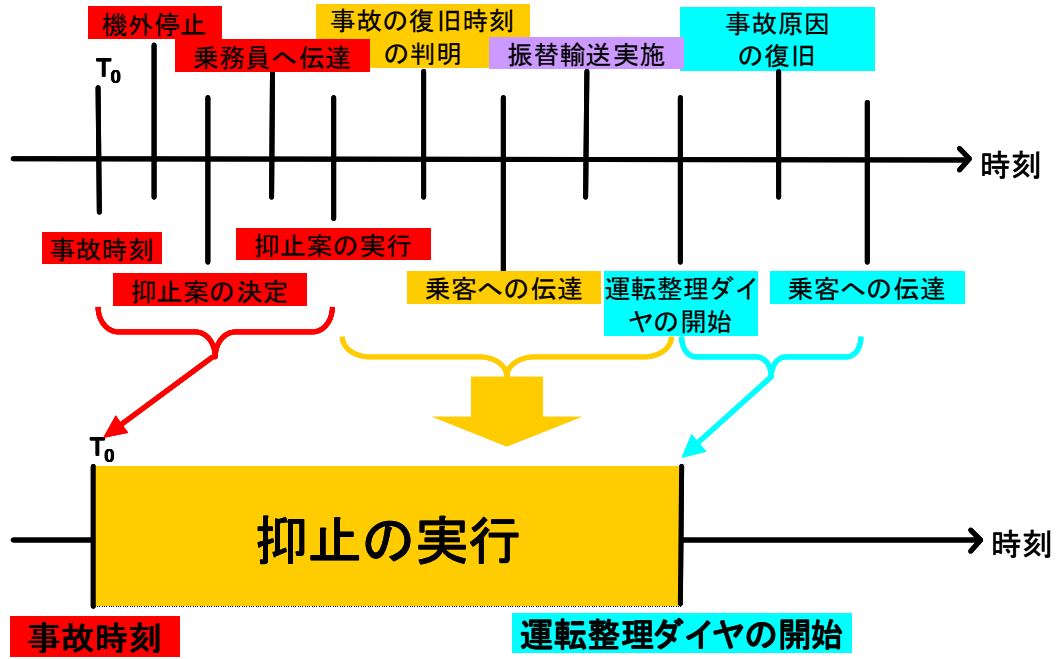


図 4.1 運転整理実施時に発生する事象の集約

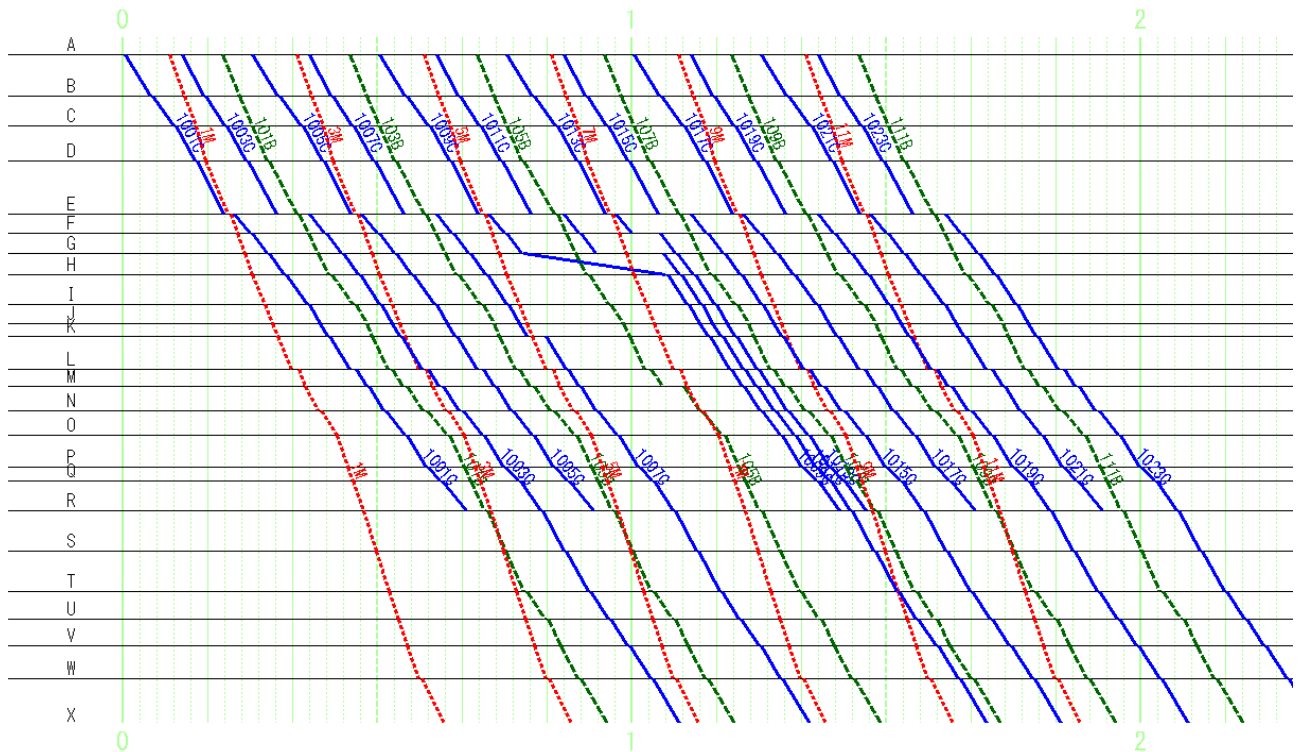


図 4.2 事故・障害発生時刻にすべての事象を集約した運転整理案

4.1.2. 運転整理案作成時間を考慮したシステムのモデル化

ここで、先に述べた運転整理案作成時間を考慮したシステムの詳細なモデル化を行う。以下、順を追って提案するモデルを詳述する。

(1) 暫定運行計画の仮定

まずは、挿入する暫定運行計画についての検討を行う。本研究では、障害発生時に存在していた多くの事象を2つに集約することを考える。これは、瞬時に多様な情報を収集し複雑な整理問題を解くことは不可能なので、まずは1つになっていた事象を2つに増やし、情報収集、整理案作成、その実施に必要な情報伝達に要する時間を明示的にシミュレーションのシナリオで考慮することを意味する。そこで、図4.1で示したように事故時刻と運転整理案開始の2時点に各事象の集約を行う。事故時刻と運転整理案の開始時刻に集約される事象は、上記の思想を反映し、以下のように分類される。

事故時刻：機外停止、抑止案の作成・実行、運転整理案の作成・実行可能時刻、乗客への情報伝達

運転整理案の開始時刻：運転整理案の伝達・実行、乗客への情報伝達

具体的に各事象の時系列を示したものを図4.3に示す。この2つの事象の間において、事故列車の復旧時刻の判明などによって運転整理案が作成されていることになる。この時間帯が運転整理案の作成実行までの時間を表現している。なお、本研究では振替乗車は考慮しない。

次に、正常時と運転整理案の間に挿入する障害発生直後に抑止と時隔調整を行う暫定整理案の作成について述べる。事故直後に適用される暫定運行計画は、瞬時的に作成・実行される必要がある。そこで、本研究では、現実に近いシステムを作成するために基本的な運転整理手法の適用メニューを限定する。まずは、最も初歩的なものとして、先に説明した関係列車の抑止に着目する。伝統的な実務においても列車運行の障害が発生した場合、まずこの抑止が最も多く行われる。すなわち、後続列車の機外停車を防ぎ、乗客の不安と不満を抑えるのが最優先とされている。本節では、図4.3で示すように暫定運行計画にこの抑止を最優先で適用する。

暫定運行計画作成時における条件を以下にまとめる。抑止を行う列車は、障害発生時刻において、障害発生列車より後ろを走行している列車である。抑止の解除は運転整理案が作成・実行されるときである。また、障害発生時刻において、障害発生列車よりも先を走行している列車はそのまま運行を継続する。乗客への情報伝達は、各事象の変化ごとに瞬時に行われることとする。さらに、ここで適用される暫定運行計画は、あらかじめ基本的な暫定運行パターンとして準備が可能であるので、事故時刻において瞬時に作成され、乗務員への伝達および実行が行われると仮定する。

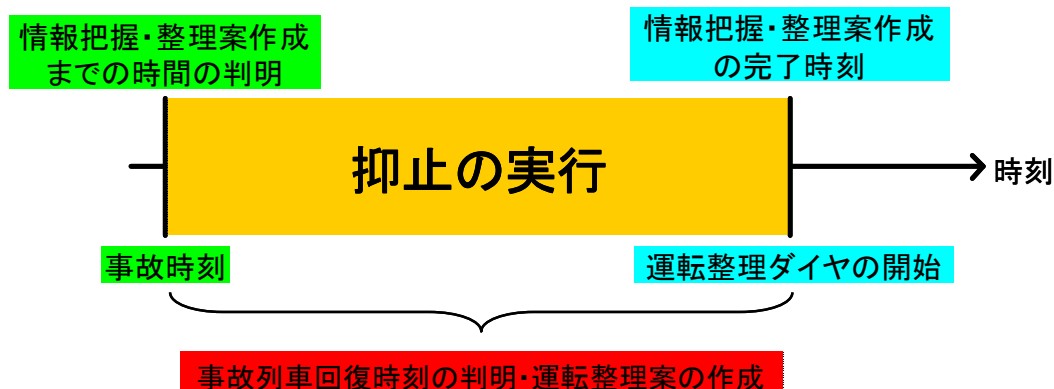


図4.3 暫定運行計画の挿入

(2) 抑止対象列車の選択と抑止時間の決定

ここで、抑止を行う列車の詳細な選択方法を述べる。抑止の方法としては、事故時刻が発生した場合、後続の各列車は最寄りの駅まで運行を行い、停車・抑止する。抑止対象列車の選択方法と、抑止を実行する時間を図4.4に示す。まず、障害発生列車の後続の列車で、事故時刻後最初の発ノードを検索する。例えば、事故時刻に駅間を走行中の列車は次駅の発ノードが事故後最初の発ノードになり、事故時刻に駅に停車中の列車の場合はその駅の発ノードが事故後最初の発ノードとなる。図4.4においては、列車Aは事故時刻に停車中の駅Bでそのまま抑止、列車Bは事故時刻に走行中のために次駅Aで抑止される。図中に示した各ノードが、事故後最初の発ノードである。そして、運転整理案の開始時刻まで、該当列車をそのまま停車させる。その後、各列車は運行を再開する。以上が、暫定運行計画における抑止の概要である。

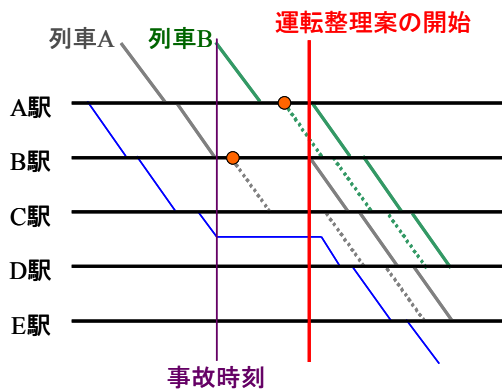


図4.4 抑止対象列車の選択

(3) 運転整理案作成時間を考慮した運行計画

これまで述べてきた暫定運行計画の実行後に、複数の運転整理手法を組み合わせ適用した運行計画を追加する。作成した運行計画の簡易図を図4.5に示す。このように、いままで2つのみであったダイヤを3つにすることによって、本格的な運転整理案が開始されるまでの事象を時間軸上で正しく表現することが可能になる。本論文で提案する乗客流推定において、暫定運行計画適用後と運転整理案の開始後の2点で、各々の時点を初期値としその時点で与えられた運行計画に基づく解析を行う。その結果に基づき、最終的に全体の運転整理案の評価が正しく行えるようになる。

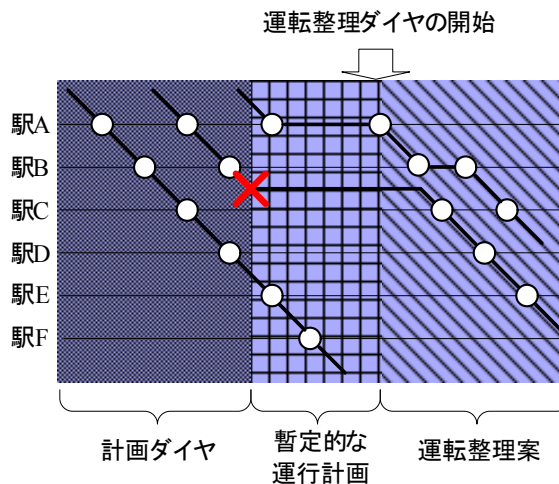


図4.5 運転整理案作成時間を考慮した運行計画

4.2. 運転整理案作成時間の考慮による影響

本節では、実際にモデル路線を対象としたケーススタディを行い、運転整理案作成時間の考慮による影響を検証する。

4.2.1. モデル路線による検証

ここで、対象とするモデル路線について述べる。モデル路線は、A~Xまで24駅からなる都市路線とする。全区間が方向別複々線である。急行、快速、普通の3種類の運行パターンが存在する。正常な運行時には急行が急行線、快速、普通が緩行線を走行する。15分周期に急行1本、快速1本、普通2本が運行している。駅E, Lで急行と普通、駅E, Rで快速と普通が接続を行っている。この路線の計画ダイヤを図4.6に、各運行列車の停車パターンを図4.7に示す。

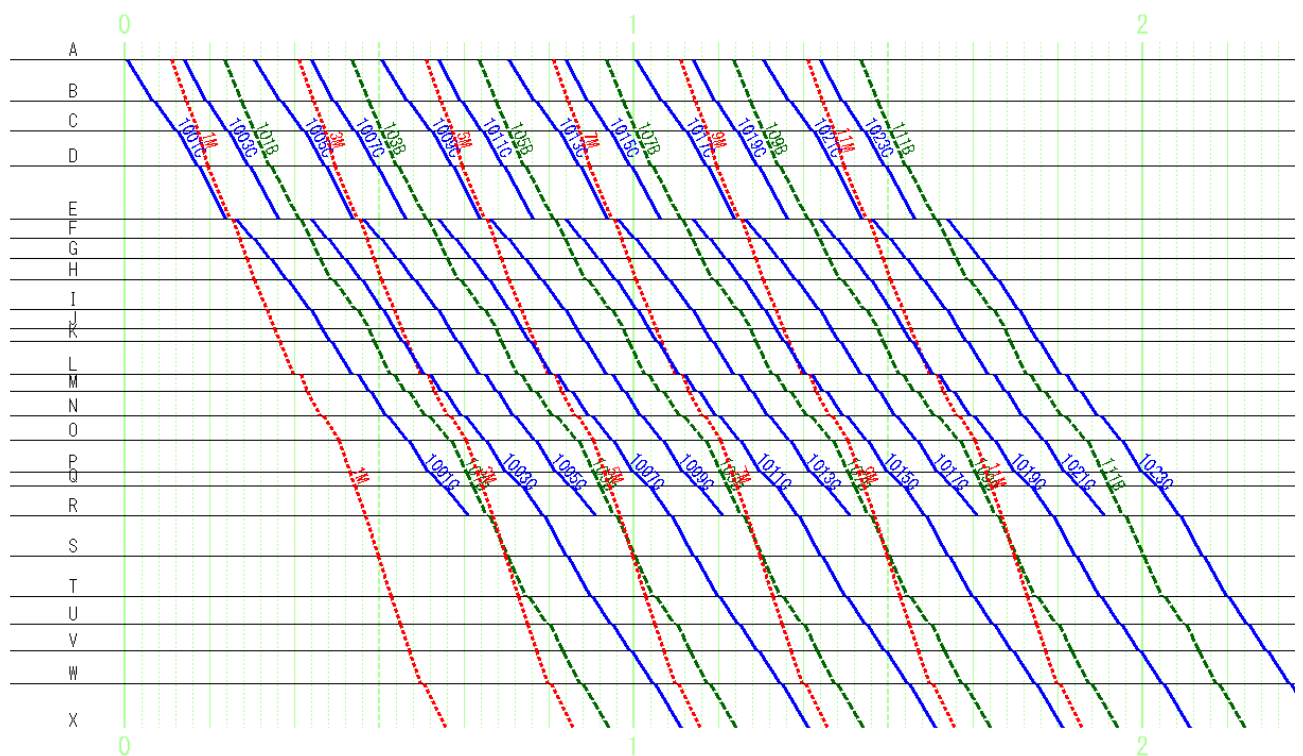


図4.6 モデル路線の計画ダイヤ

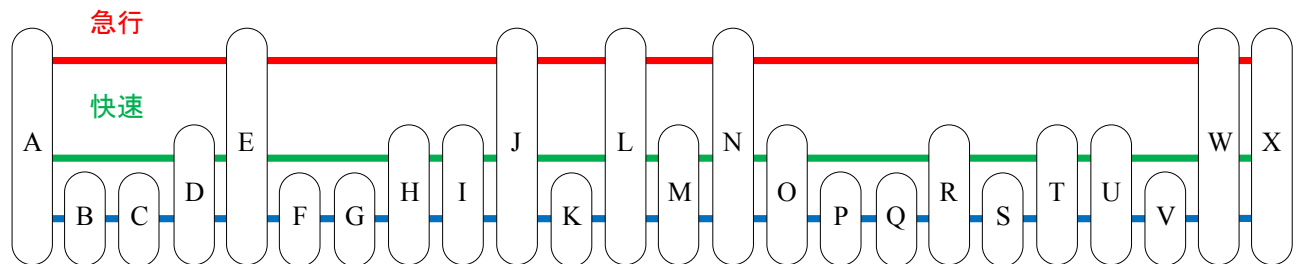


図4.7 各運行列車の停車パターン

4.2.2. 運転整理案作成時間の考慮による影響

本節では、先に提案した手法をモデル路線に適用し、ケーススタディを行う。また、それによる運転整理案の評価値への影響も考察する。

(1) 列車ダイヤへの表現

まずは、作成される列車ダイヤについて述べる。駅 G~H 間を走行中の普通列車 1009C に 700 秒の遅延が生じた場合のダイヤを示したものが図 4.8 である。先行研究^{[8][12]}は、図 4.2 に示すように障害発生直後に運転整理案が作成・実行された。一方、本研究では、運転整理案の作成・実行までに 450 秒が必要であったと仮定し、図 4.9 に示すように運転整理案の作成中に抑止のみを行う暫定運行計画を作成・挿入する。この時間帯では、障害発生列車の後続列車に抑止を適用している。ここでは、事故発生列車 1009C の後続列車である普通列車 1011C と快速列車 105B、普通列車 1013C が抑止の対象となる。普通列車 1011C は事故時刻において駅 E において停車中のために、駅 E の発ノードが事故後最初の発ノードとなり、駅 E で抑止される。快速列車 105B と普通列車 1013C は事故時刻において走行中のため、それぞれの次の停車駅である駅 E と駅 B の発ノードが事故後最初の発ノードとなり、それぞれ次駅まで運行した後に該当駅で抑止されている。この抑止によって、機外停止の回避がされている。

さらに、障害発生から 450 秒後に運転整理案が作成・実行されたダイヤが図 4.10 に示すものである。ここで適用される運転整理手法は列車間隔を考慮した抑止と時隔調整、および快速列車の駅 G における臨時停車になっている。時隔調整と臨時停車は、運転整理案の開始時刻から各列車に対して適用されている。計画ダイヤと運転整理案の間に暫定運行計画を挿入したことで、整理案を作成し伝達するために必要な時間を表現することが可能となり、より現実的な整理案の表現が可能になった。ただし、本ケースでは内側の緩行線のみ障害が発生したため、外側の急行線の運行は暫定案実施中も継続されている。

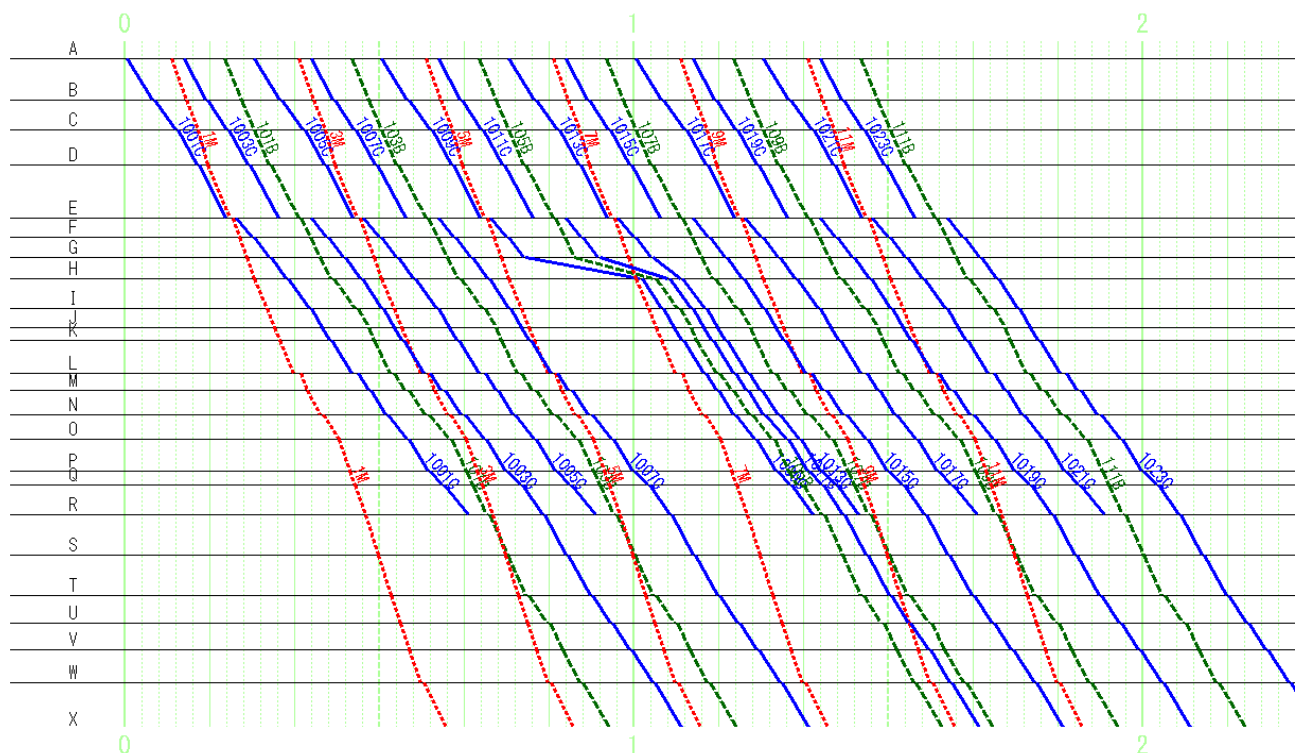


図 4.8 障害発生後のダイヤ

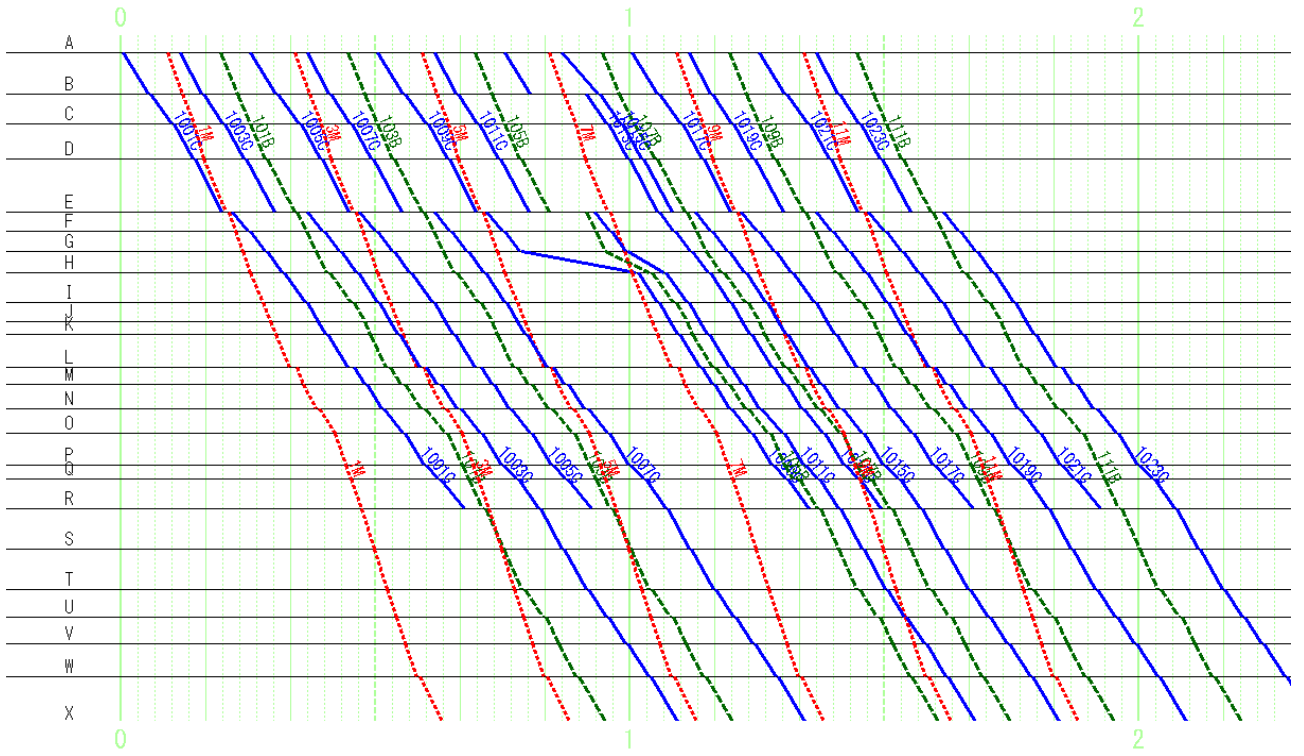


図 4.9 暫定運行計画を挿入したダイヤ

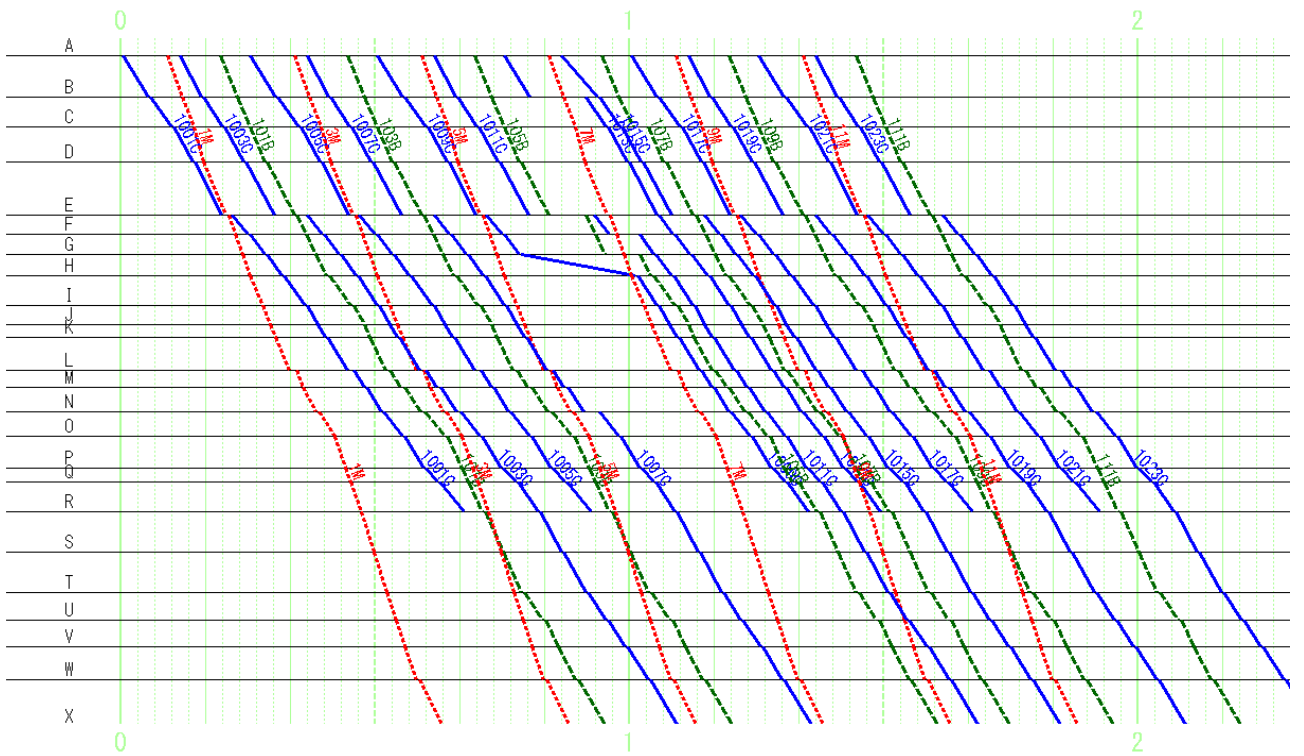


図 4.10 暫定運行計画を挿入したダイヤ (運転整理後)

(2) 列車ダイヤの評価値の考察

ここで、運転整理案作成に必要とされる時間を表現した手法によって作成したダイヤの評価を行う。提案した手法を用いた運転整理案と先行研究^[8]の手法による運転整理案の評価値を比較したものを図4.11に示す。この図からもわかるように、これまでの手法に比べ本研究において提案する手法では評価値は悪化している。さらに、事故発生後の詰めダイヤよりも評価値が悪化していることがわかる。本研究の主要な変更点は、事故発生時刻と運転整理案の開始時刻までに暫定運行計画を挿入したことである。この一時的に挿入したダイヤの影響が評価値悪化の原因と考えられる。そこで、図4.11で示した評価値の総和を所要時間のみと、乗換損失と混雑度に分けて比較する。それぞれの手法による所要時間の比較を図4.12に、乗換損失と混雑度の比較を図4.13に示す。

図4.12と図4.13から事故後に比べて乗換換算と混雑度は低減しているが、所要時間の増大が評価値の悪化に大きく影響していることがわかる。特に所要時間は、他の2つの評価値と比べても値の変化が大きい。所要時間を大きな増加は、乗客1人1人の移動時間の増大によって発生する。先行研究^[8]による整理案と事故後ダイヤ、本研究による整理案のダイヤを記した図4.2と図4.8、図4.10を比較する。特に、普通列車1011Cと快速列車105Bに乗車して、駅Fまたは駅Gに向かう乗客は運転整理案作成のために450秒抑止されたことによって、それぞれ300秒近く余分な所要時間を負わされていることになってしまった。また、普通列車1013Cに乗車して駅Cと駅Dに向かう乗客も同じく300秒近い余分な所要時間を負わされている。以上の所要時間増大より、提案手法による整理案の評価値悪化の理由説明できる。つまり、暫定運行計画において後続列車の抑止のみを行ったために、抑止対象列車に乗車していた比較的多くの乗客の所要時間が増大したことが、評価値の悪化に大きく寄与している。すなわち抑止によって列車を一定時間停車させる暫定処置が不適切であったことによる。そのため、暫定ダイヤについても、比較的簡単な判断に基づきながらも損失の増加を抑制できるより適切な運転整理手法を実装する必要があると考える。

一方で、評価値自体は適切な値を提示できていることも確認できた。

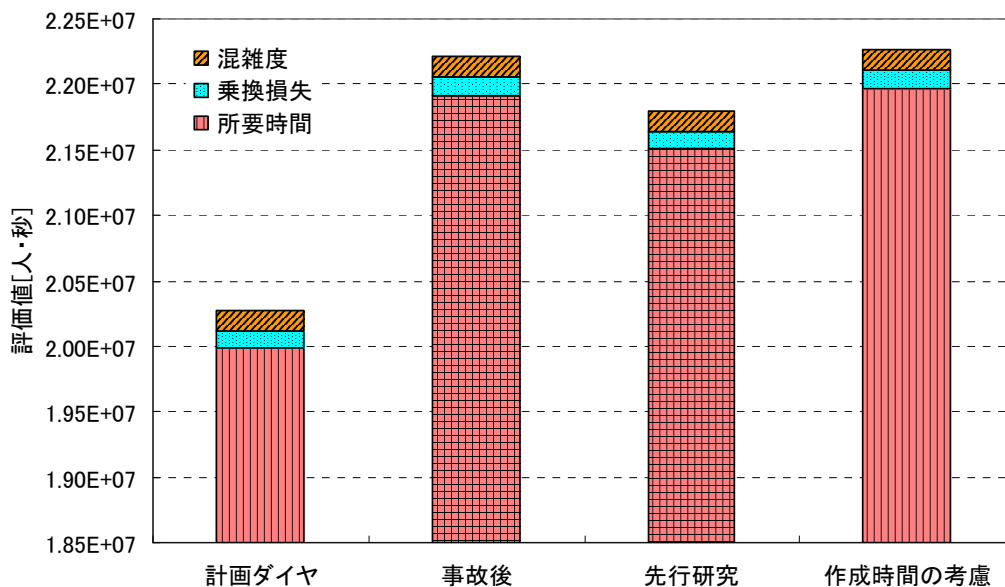


図4.11 運転整理案作成時間の考慮による影響

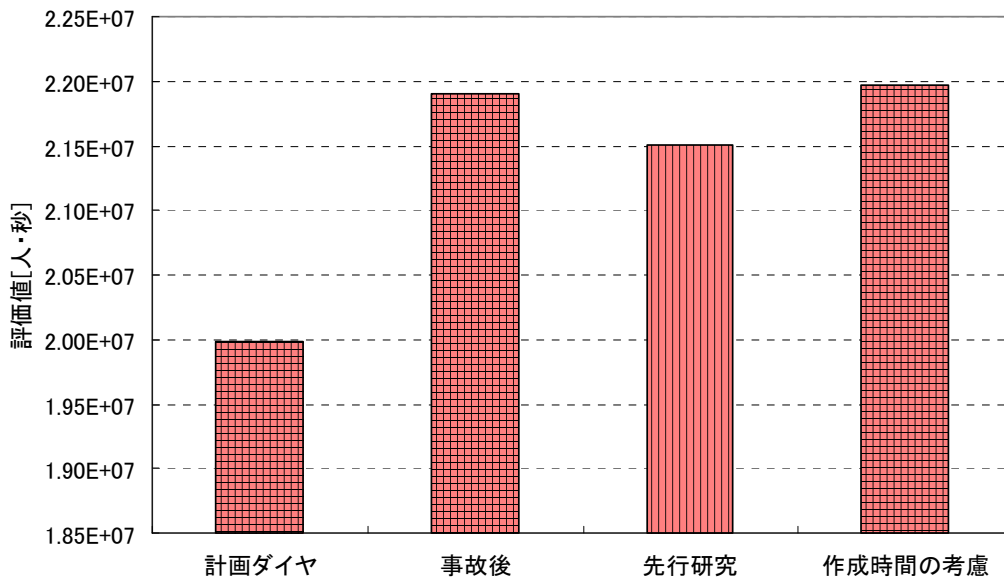


図 4.12 所要時間のみの比較

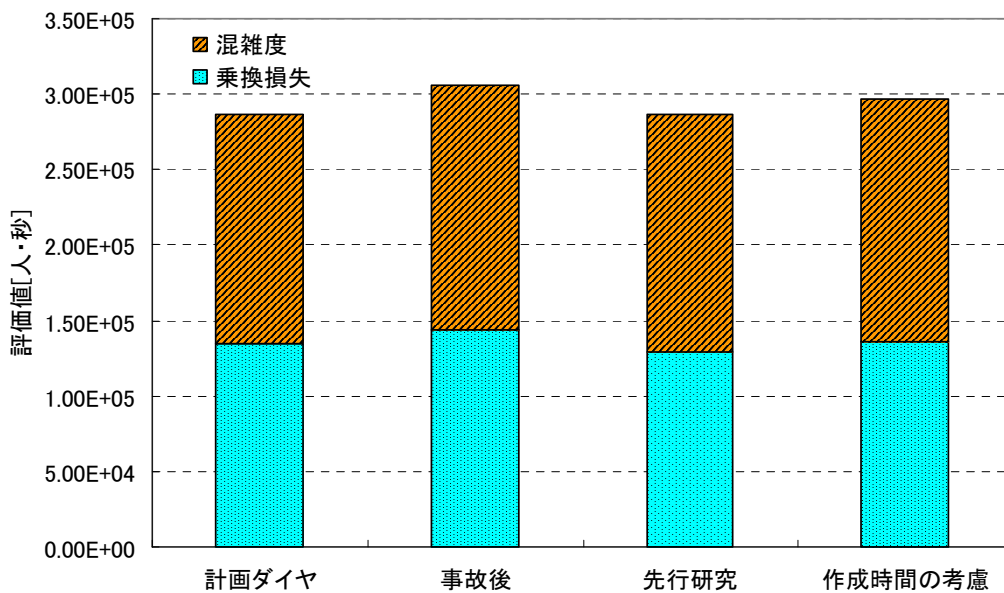


図 4.13 乗換損失と混雑度の比較

4.3. 暫定運行計画による影響

本節では、先に問題となった単純な抑止のみを行った暫定運行計画の改良を検討する。暫定運行計画に適用した単純な抑止が所要時間の増大、ひいては損失の増大に影響を与えていた。そこで、暫定運行計画中もある程度積極的に列車運行を継続する方針を具体化する。ここでは、同じモデル路線を用いたケーススタディを行う。

4.3.1. 暫定運行計画の提案

暫定運行計画は、瞬時に作成・実行されなくてはならない。そのために、このダイヤに適用できる手法としては、高度な場合分け判断を必要としない定常的なパターンが必要とされる。これまで述べてきた抑止のみの暫定運行計画に代わるダイヤとして、ここで2つの手法を提案・検証する。1つは、暫定運行案中も後続列車を運行可能なところまで運行させる方法である。もう1つは、運転整理案開始時に列車が均等に配置されるように、暫定運行計画を決定する方法である。前者では、列車運行の距離に対する運行計画への影響を検討する。後者では、列車配置の均一性による運行計画への影響を検討する。

(1) 暫定運行案中も後続列車を運行

まず、暫定運行案中も後続列車を運行可能なところまで運行させる手法について検証する。ただし、暫定運行案を変更するうえで、機外停止を回避するという条件は付加する。これまでも述べた通り、機外停止を行うと乗客を列車内に閉じ込めることになり、乗客の不安と不満を大きく増大させるからである。本節では4.2節と同様のケースを対象として、検証を行う。4.2節までの手法による結果である図4.10を考慮すると、暫定運行計画中に運行距離を大きく変更できるのは普通列車1013Cである。事故発生時刻直後に駅A~B間を走行中であった1013Cは、これまでの暫定整理手法では駅Bに抑止され、運行開始時刻まで約300秒近く停車した状態になる。そこで、この状態から機外停止を回避する条件の下で、少しずつ運行継続距離を延ばしていく。1013Cを駅Bまで運行した図4.14は、図4.10と同様である。この状態から、運転整理案作成中の450秒の間において、駅Cと駅Dまで運行した状態を作成する。その結果が図4.15と図4.16になる。1013Cは、駅E以降においては主たる運転整理案適用後であるため、考慮しない。

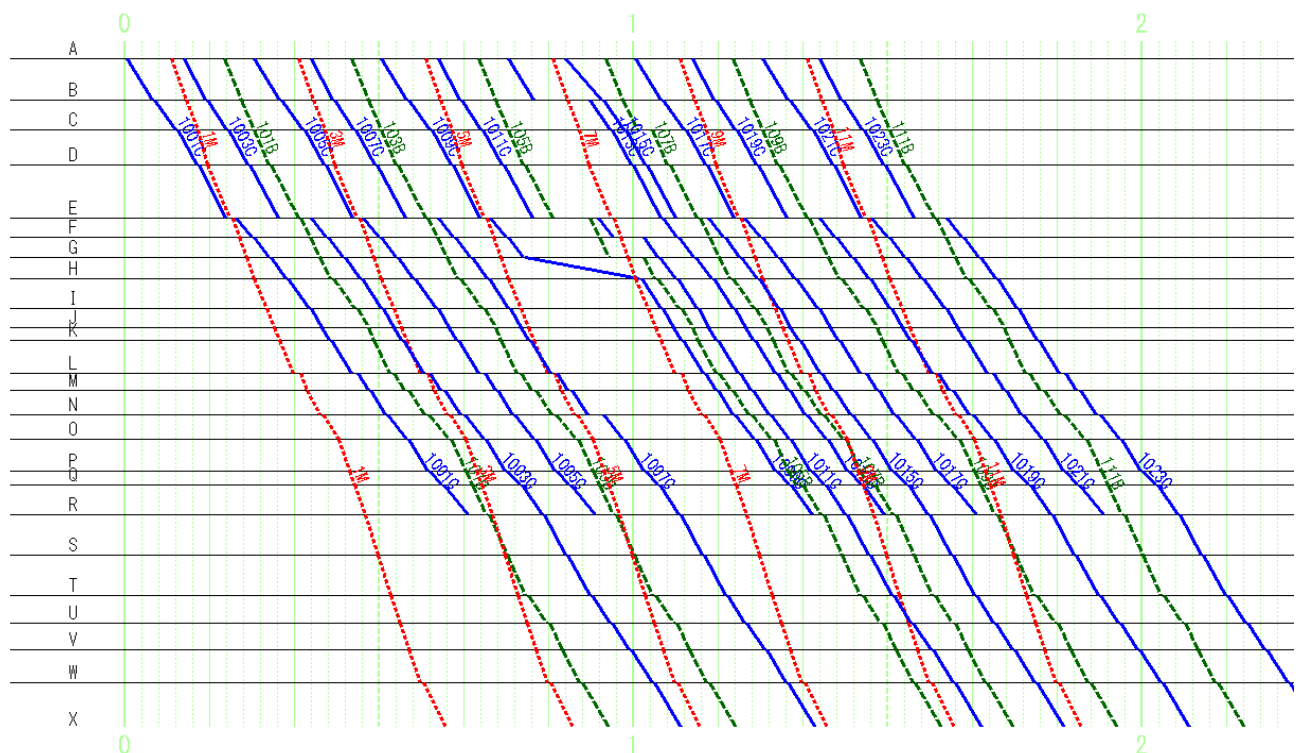


図4.14 暫定運行計画を挿入したダイヤー1013CがB駅まで運行

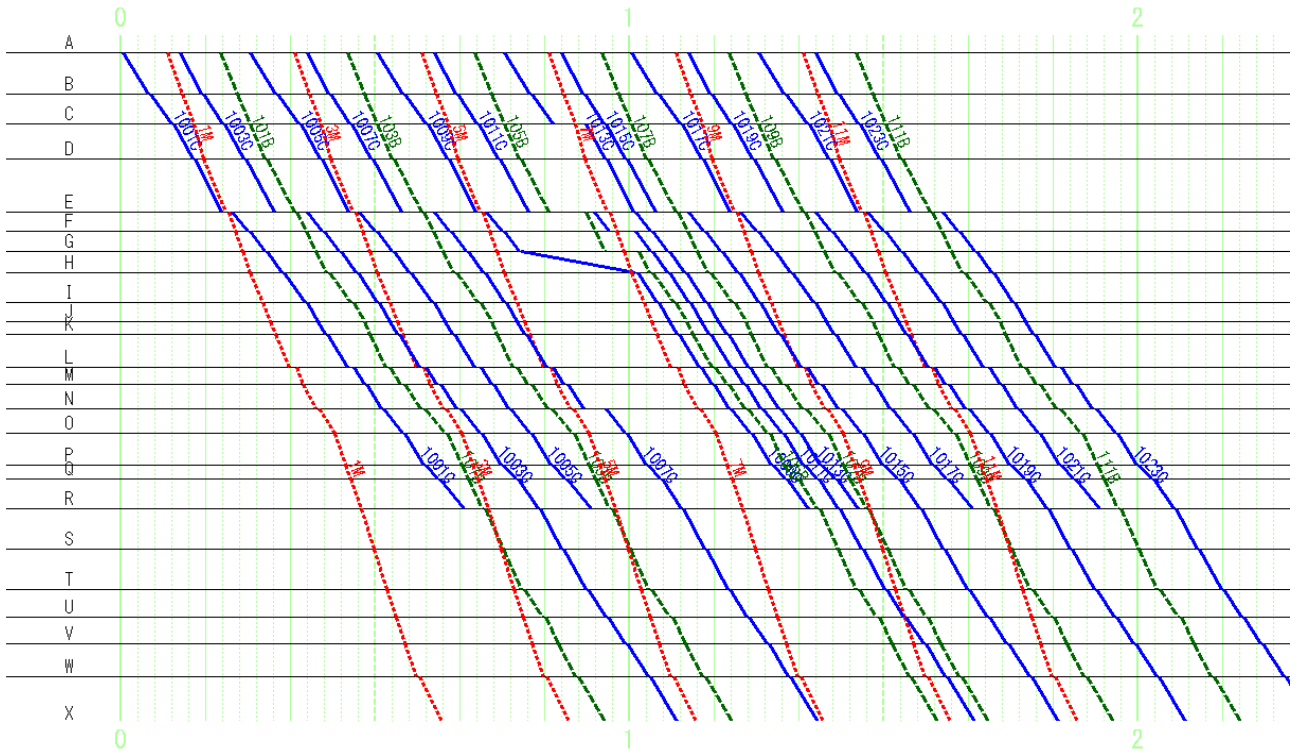


図 4.15 暫定運行計画を挿入したダイヤー1013C が C 駅まで運行

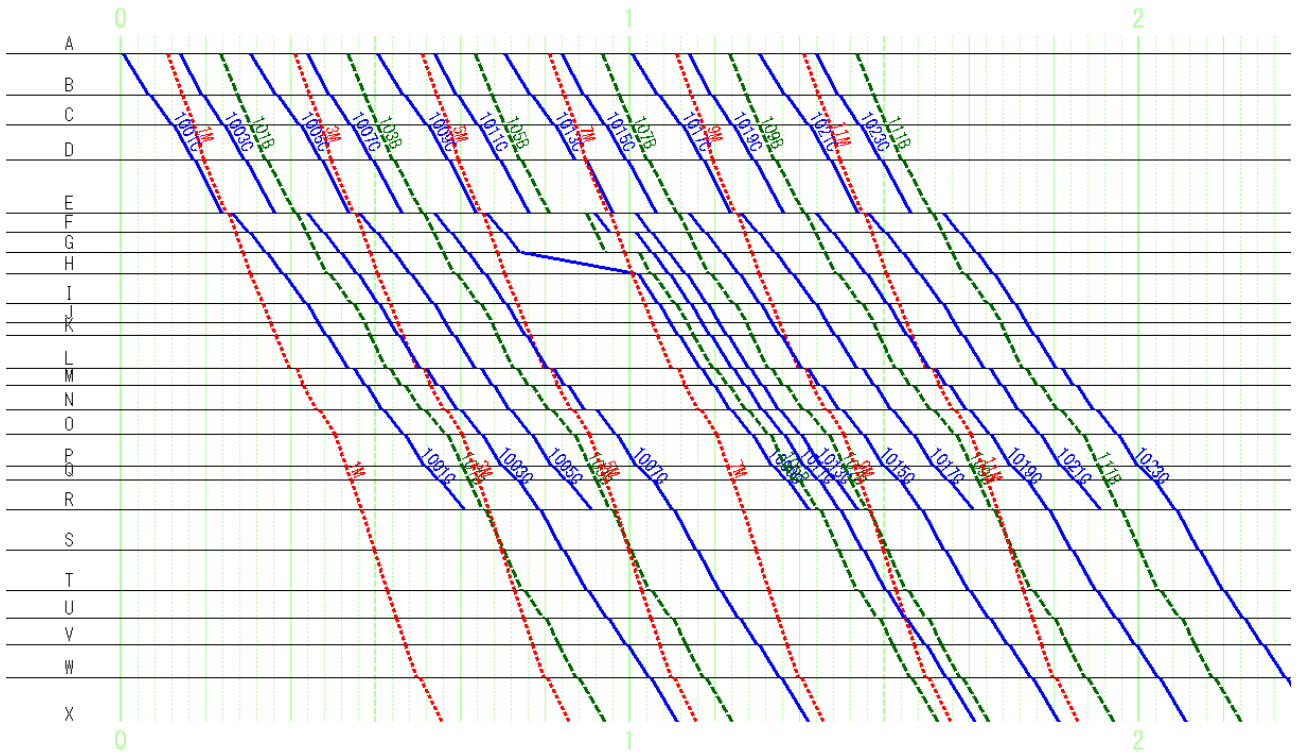


図 4.16 暫定運行計画を挿入したダイヤー1013C が D 駅まで運行

(2) 運転整理案開始時における列車の均一性

ここでは、主たる運転整理案の開始時に障害発生列車の後続列車の均一性が重要であるという経験則を考慮する。列車の運行を再開する場合、各列車が存在する初期位置によって運転整理手法の選択や作成される整理案の状態は変化する。また、主たる運転整理案の実行時において、事前に列車の配置を均一しておくことによって、列車の運行間隔も均一にできる可能性が高い。その結果、各駅に滞留している乗客を分散して輸送することが可能になり、混雑度の偏りを本質的に緩和することができる。

4.2 節で検証した障害発生ケースにおいては、始発駅から比較的近い位置における運行障害が対象であった。このため、障害発生後における後続列車の運行間隔は、あまり大きく操作できなかつた。この検討においては、より列車間隔を変更しやすい状態で運行間隔の初期値の影響を評価するために、図4.17に示すケースを用いる。駅N～O間を走行中の普通列車1009Cに1800秒の遅延が生じた場合のダイヤを示したものが、図4.17である。この場合、外側線を走行する急行列車は正常運行を行っている。ここで、事故後の列車運行において中間付近に位置する普通列車1013Cの運行を操作することによって、それぞれの列車の運行間隔を調整する。

図4.18に示すのが、1013Cが駅Gまで運行する場合である。この場合、1013Cは駅Gにおいて運転整理案の作成完了時刻まで抑止が行われる。各列車の配置間隔は、各列車がほぼ2駅ごとに均一に停車した状態になっている。図4.19においては、1013Cが駅Hまで運行している。1013Cは駅Hにおいて抑止が適用される。各列車の配置間隔は、1013Cと1015Cの間隔が若干広くなり、1013Cと1011Cの間隔が狭くなっている。図4.20においては、1013Cが駅Iまで運行している。1013Cは駅Iにおいて抑止が適用される。この場合、1013Cと1015Cの間隔が広くなり、駅F～Hに長時間列車が来ない状態になっている。また、1013Cと1011Cの間隔が狭まることによって、駅Jと駅Kに列車が短時間で連続して来る形になる。

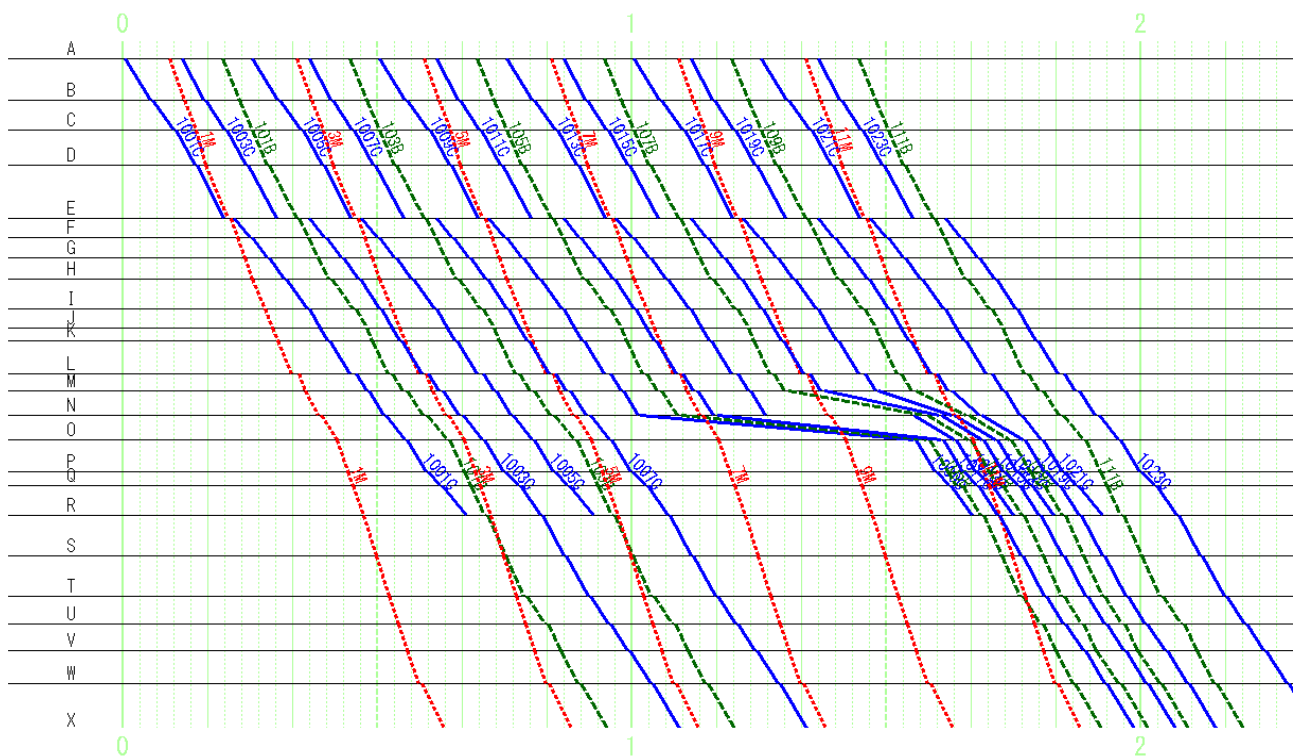


図4.17 障害発生後のダイヤ

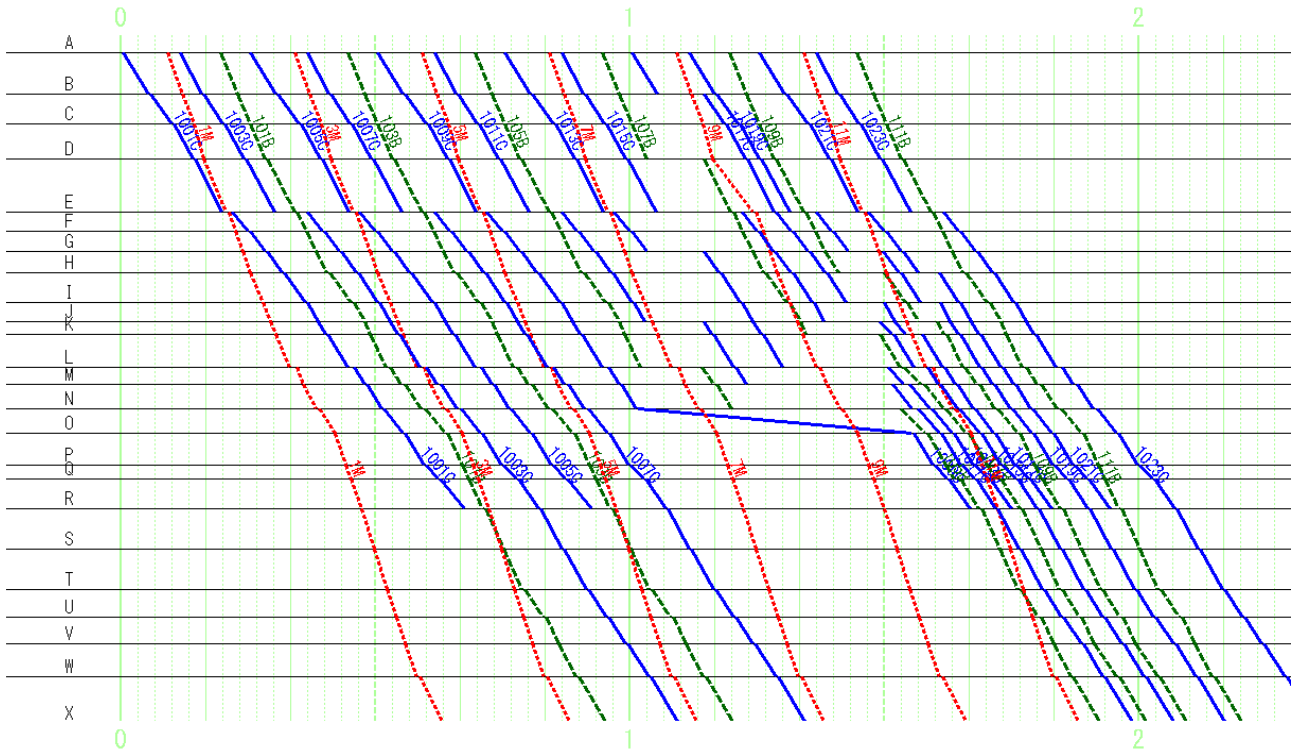


図 4.18 暫定運行計画を挿入したダイヤー1013C が G 駅まで運行

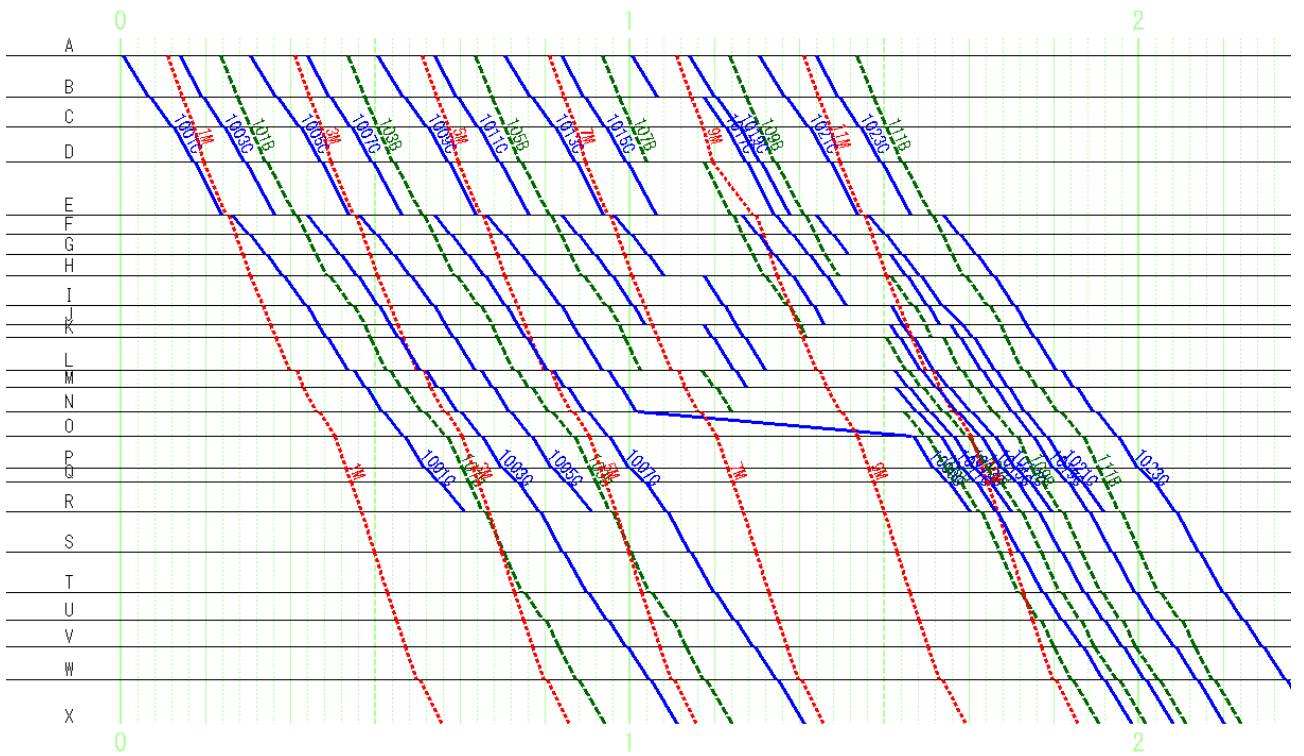


図 4.19 暫定運行計画を挿入したダイヤー1013C が H 駅まで運行

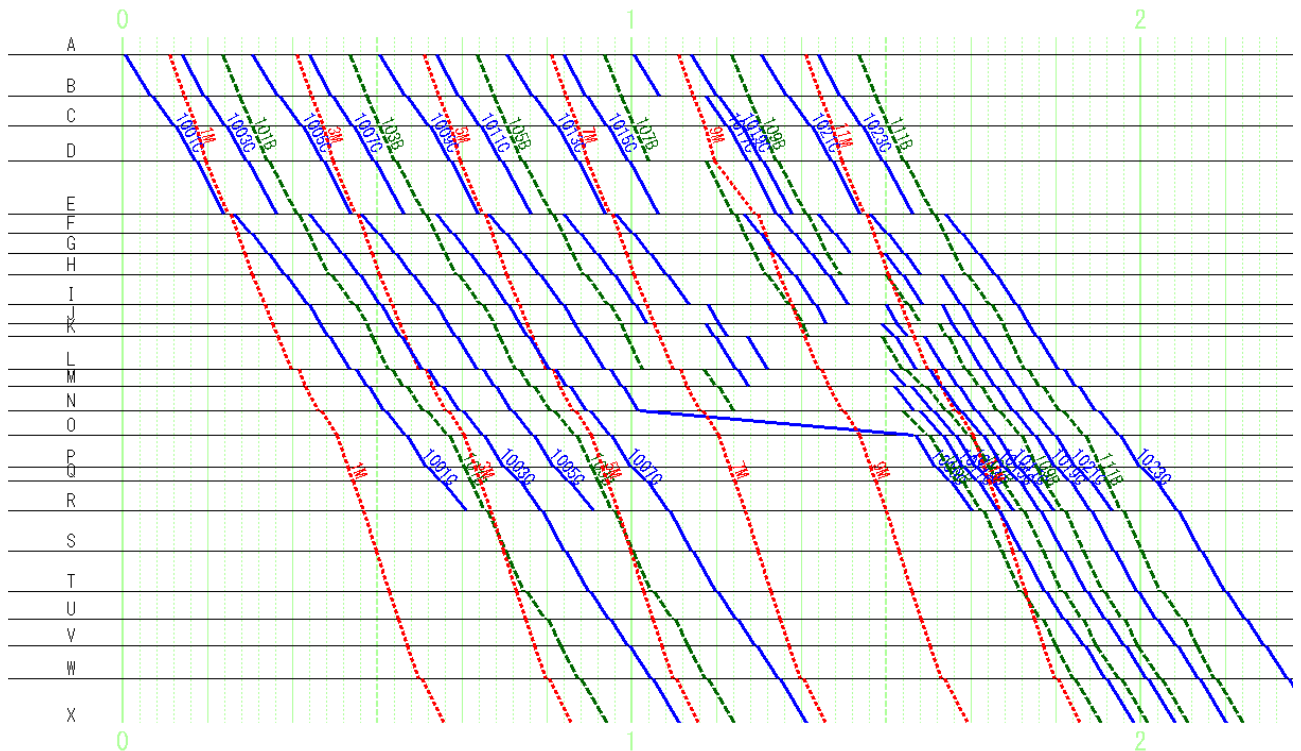


図 4.20 暫定運行計画を挿入したダイヤー1013C が I 駅まで運行

4.3.2. 暫定運行計画の変更による影響

4.3.1 で作成した暫定運行計画を変更した運転整理案の評価を、ここで行う。

(1) 暫定運行案中も後続列車を運行

図 4.21 に、障害発生後のダイヤの評価値と図 4.14 から図 4.16 の各運転整理案の評価値を比較して示す。この場合、普通列車 1013C を駅 D まで運行した方が、乗客に与える損失が少なくなった。また、障害発生後の状態よりも乗客の損失が減少することが確認できる。

詳しく検証すると、乗換換算と混雑度における各整理案の違いはほとんどない。駅 D で抑止を行った方が混雑についてはむしろ増大している。これは、1011C と 1013C と列車間隔が広がったことによって、1013C の乗客が増大し、混雑度が上昇したためと考えられる。全体結果に大きな差異を生じさせているのは、各乗客の所要時間の総和である。1013C を駅 D まで運行したことによって、駅 C と駅 D に向かう乗客は駅 B で抑止を行った場合に比べて、120 秒以上早く到着することができた。このため、この乗客たちの所要時間減少が全体の評価値に大きく影響したものと推測できる。図 4.16 と図 4.14 における乗客すべての所要時間の差と、駅 C と駅 D に向かう乗客数と短縮された所要時間を計算したものを比べると、両者がほぼ近い値になっている。このことは、解釈の妥当性の傍証になる。

以上より、始発駅から近い場所で発生した運行障害に対しては、できる限り抑止を避け列車運行を継続した方が妥当であるという暫定方針が得られた。ただ、このケーススタディでは、列車の運行間隔は大きく変化せず、比較的均一になっている点は留意すべくだろう。

列車の運行間隔が主たる運転整理部を含む全体の評価に与える影響は、次で詳説する。

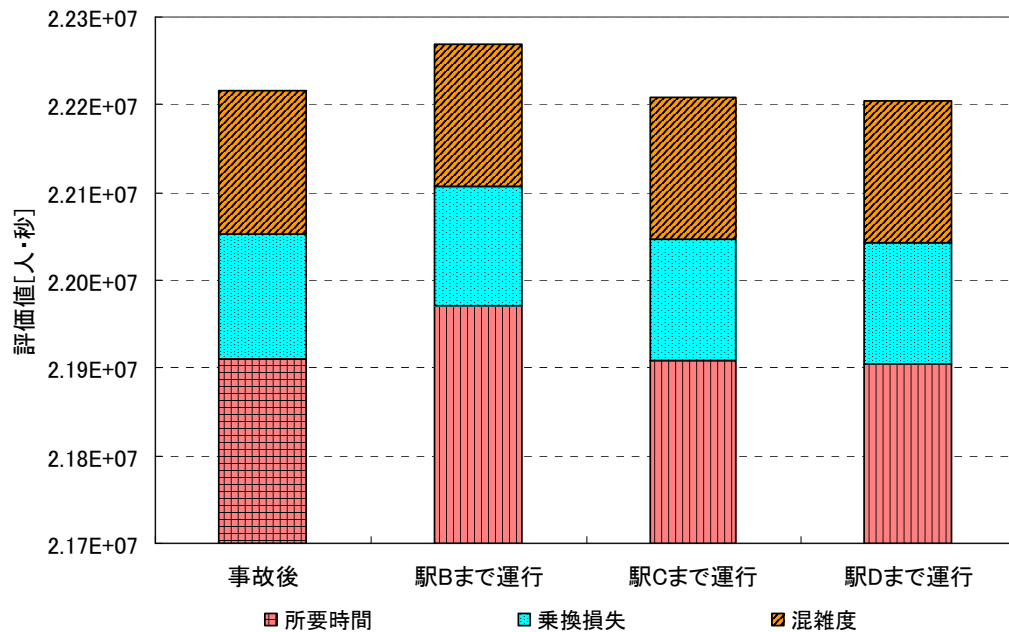


図 4.21 暫定運行案中における運行継続距離の影響

(2) 運転整理案開始時に列車が均等に配置

図 4.22 に、図 4.17 における障害発生後のダイヤの評価値と図 4.18 から図 4.20 の運転整理案の評価値を表した結果を示す。図 4.18 から図 4.20 のケーススタディでは、図 4.14 から図 4.16 の比較よりも、障害発生後の列車の運行間隔が大きくなっている。この場合、普通列車 1013C を駅 G において抑止した状態にしたほうが、乗客に与える損失が少なくなった。また、障害発生後の状態より乗客の損失が減少できていることも確認できる。

詳しく検討すると、「暫定運行案中も後続列車を運行」の場合と同様に、乗換換算と混雑度では各整理案の違いがほとんどないことがわかる。全体的評価値の結果に大きな差異を生じさせているのは、やはり各乗客の所要時間の総和である。「暫定運行案中も後続列車を運行」の場合においては、列車の運行距離を増加させた方が乗客の損失が低減されるという結果が得られた。一方、今回のケースでは全く反対の結果になった。先の場合との相異は、列車の運行間隔が大きくなったことである。図 4.18 における各列車の配置間隔は、各列車がほぼ 2 駅ごとに均一に停車した状態になっている。図 4.19 における各列車の配置間隔は、1013C と 1015C の間隔が若干広くなり、1013C と 1011C の間隔が狭くなっている。さらに、図 4.20 における各列車の配置間隔は、1013C と 1015C の間隔が広くなり、駅 F~H に長時間列車が来ない状態になっている。

この場合は、各駅に滞留している乗客数が大きく影響を与えていると考えられる。乗客すべての所要時間損失は、乗客数×各乗客の所要時間で求められる。図 4.20 において、駅 F~駅 H 間における乗客は、運行再開後も 1015C が到着するまで、各駅において長時間待たなくてはならない。この乗客たちの待ち時間を含めた所要時間の増大が、図 4.20 の整理案における評価値の悪化を招いている。逆に、図 4.18 では、列車間隔を均一にしたことによって、駅 F において待つ乗客のみが、後続の列車を長時間待つのみで、待ち時間の増大が全体では抑えられている。以上より、列車間隔を均一にすることの効果は、各駅の滞留乗客数×待ち時間の減少による所要時間の短縮に起因している。

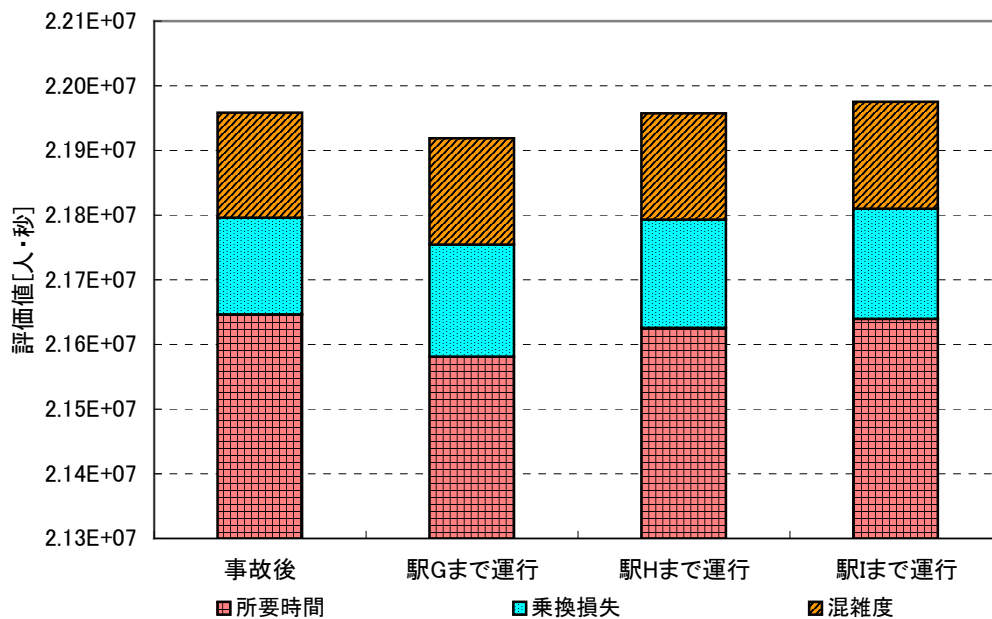


図 4.22 暫定運行案中における列車配置による影響

4.4. まとめ

本章では、運転整理案作成及び実行に要する時間を考慮した運転整理支援システムへの提案と、その影響の検証を行った。

運転整理案作成及び実行に要する時間を考慮した運転整理支援システムの拡張として、計画ダイヤと主たる運転整理ダイヤの間に整理案の作成を表現した暫定運行を挿入することを提案した。すなわち、これまで障害発生後の時刻に集約されていた事象を、2 つに増加・分割することが可能とした。これにより、時刻経過を考慮したより現実的な整理案の作成が可能になった。

しかし、この暫定運行計画の挿入によって、整理案の評価値が悪化してしまう傾向が見えた。これは、暫定運行計画において、単純な各列車の抑止を適用したからであった。そのため、各乗客の所要時間が増加によって、整理案の評価値が悪化していた。

所要時間増大への対策として、暫定運行計画の改善を図った。その方法として、「暫定運行案中も後続列車を運行」と「運転整理案開始時に列車が均等に配置」の2つの方法を提案・比較した。その結果、始発駅付近で障害が発生し、列車間隔が変化しない状況下においては、「暫定運行案中も後続列車を運行」の手法適用が効果的であることがわかった。また、始発駅から障害発生箇所が遠く、障害発生によって列車間隔が大きくなる状況下では、「運転整理案開始時に列車が均等に配置」の手法適用が効果的である傾向がみられる。障害発生状況に応じ、暫定運行計画にどのようなパターンを適用するかを、簡単ルールに基づき変更する必要がある。

第5章

方向別複々線の特長を生かす運転整理手法と その適用の考え方

第4章では、作成する運転整理案において、暫定運行計画後の整理案には、抑止と時隔調整のみしか実装していなかった。つまり、主たる運転整理案と暫定運行計画との違いは時隔調整の有無のみであった。本研究の対象となる方向別複々線区間は各種運転整理手法を適用する上で、より自由度の高い区間である。本章では、この方向別複々線の特長を生かした運転整理手法である運転線路変更と、その適用法について検討する。

5.1 複々線区間における運転整理手法

都市近郊の鉄道においては、上下線に1本ずつの線路を持つ複線が一般的である。複線の場合、同方向の線路が1本のみであるためにその線路が運行不能になると、運転整理手法を適用したとしても、片方向の運行が不通になる区間が発生することを回避できない可能性が高い。しかし、複々線区間においては同方向の線路が2本存在するため、1本の線路が使用不能になっても、もう一方の線路を使用して運行が可能である。つまり、複線・単線区間に比べて適用可能な運転整理手法が多様であり、上記の例においても、片方向の運行が不通になる区間が発生することを回避できる可能性が高い。特に、本研究で対象とする方向別複々線は、同方向の線路が2本並んだ形になっているため、各列車は渡り線を用いて容易に運行する線路を変更することが可能である。

先行研究^[8]において、複々線の特長を最も活かした運転整理手法である運転線路変更の実装と、その効果が示されている。運転線路変更の例を図5.1に示す。この場合、急行は急行線を、普通は緩行線を走行している。普通Aに遅延が発生したが、普通Bを運転線路変更によって急行線で運行することによって、遅延の普及を防いでいる。本研究で、暫定運行計画後の主たる運転整理案に適用する運転整理手法にこの運転線路変更を追加する。それを通じ、運転線路変更が運転整理案に与える影響を検討する。

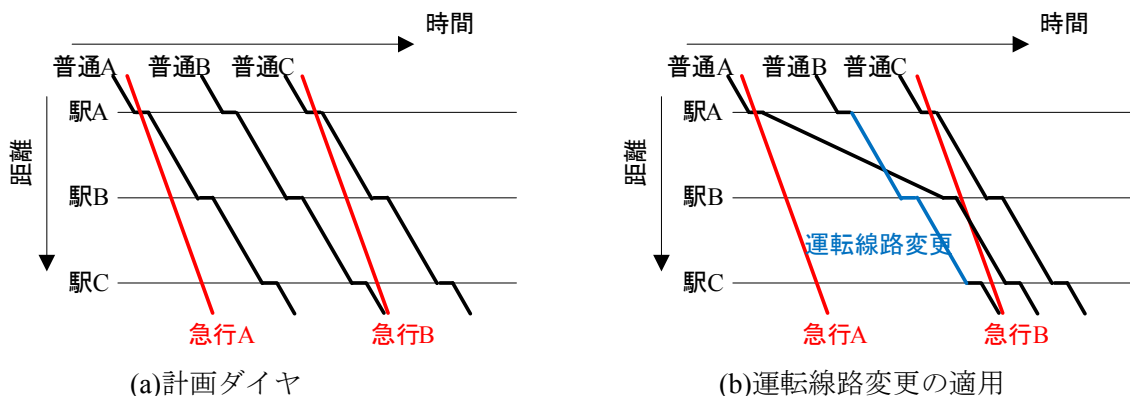


図 5.1 運転線路変更の一例

5.2. 異常時における運転線路変更

運転線路変更を適用するうえでは、いくつかの条件が存在する。運転線路変更は、障害発生時に不通区間を運行するはずであった列車を他方の線路に割振って運行する方法であるが、そのためには両方の線路をつなぐ渡り線の存在が不可欠である。そのうえで、渡り線が存在する駅でも、運転線路変更は可能な番線が限られている場合が多い。このときは、この運転線路変更と併せて、2章で紹介した着発線変更も適用する必要性が存在する。さらに、複々線区間においては、優等列車の通過駅には緩行線のみしかホームがない場合や、停車するホームによって長さが違う場合が存在する。以上より、この手法は路線の設備的に制約される。実際に運転線路変更を適用する場合には、さらにもともとその線路を運行する列車に影響を与えないよう、運行計画全体の得を考えて行う必要がある。これに加えて、運転線路変更を行ったことによって生じた列車順序の変更や、各列車の着発番線の変更に情報を適格に乗客に伝える必要がある。このように、運転線路変更は「奥の手」に対応する本格的な整理手法に類する。

ここで、先行研究^[8]で提案された運転線路変更とその適用例について述べる。

①運転線路変更の実装

列車運行を変更するには、2章で述べた列車運行グラフを変更する必要がある。運転線路変更は、対象となる列車の運転線路が変更するため、その列車運行に関与する時隔制約リンクと閉塞リンクも変更する必要がある。このため、他方の線路に移った列車は、その線路を運行する各列車からの制約条件を受けるように時隔制約リンクと閉塞リンクの修正を行い、列車運行グラフにて運転線路変更を実現する。

②運転線路変更の適用例

駅 G～H 間を走行中の普通列車 1009C に 900 秒の遅延が生じた場合に対して、運転線路変更を適用した例を示す。駅 E と駅 J、駅 N に渡り線が設置されており、急行線・緩行線間の走行線路変更が可能となっている。このとき、快速列車 105B を駅 E ～駅 J で急行線に運転線路変更し、時隔調整、抑止を適用した運転整理案を図 5.2 に示す。なお、運転線路変更を行うにあたり、駅 E において 105B と普通列車 1011C の着発線変更を行っている。実際に、先行研究^[8]でも、この効果が示されている。

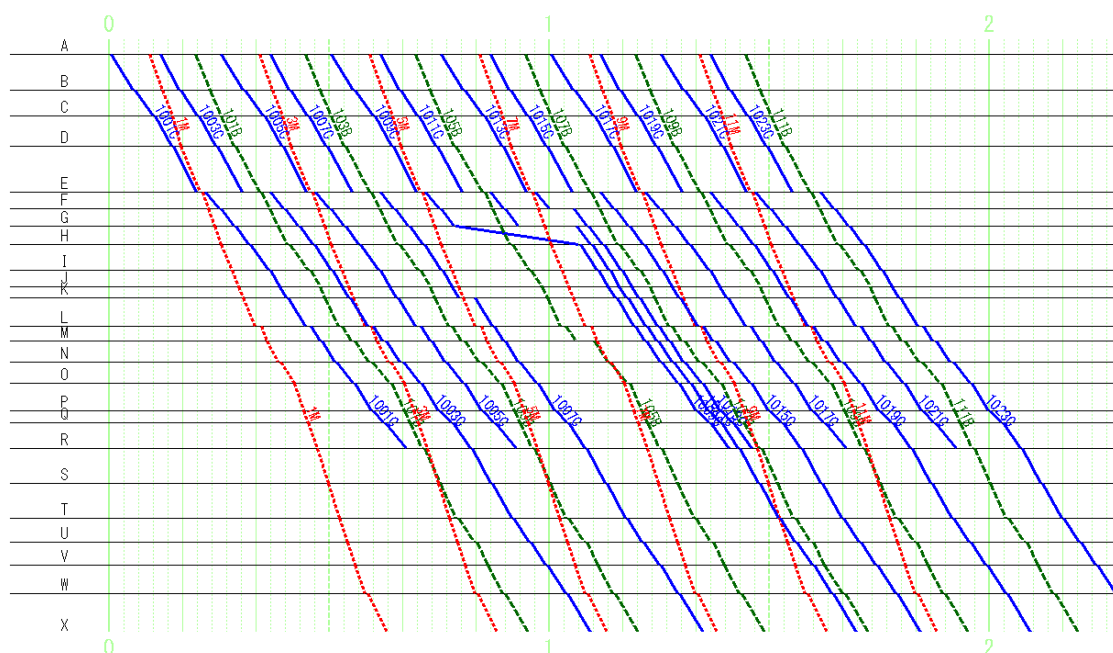


図 5.2 先行研究における運転線路変更の適用例

5.3. 自由な状況下の運転線路変更

これまで述べてきた運転線路変更を、運転整理案作成時間を考慮したシステムの実装を行い、4章で述べたモデル路線におけるケーススタディを用いて、その有効性の検証を行う。運転線路変更の実装については、先行研究^[8]の手法を踏襲する。ただし、運転線路変更の適用は、暫定運行計画が終了した後になる。つまり、暫定運行中には、運転線路変更適用の有無は未知であるとする。

駅 F～G 間を走行中の普通列車 1009C に 900 秒の遅延が生じた場合をモデルケースとする。渡り線の配置箇所は、駅 E と駅 J、駅 N である。この場合の障害発生後のダイヤを図 5.3 に示す。4章で示した暫定運行計画を挿入したダイヤを図 5.4 に示す。今回のケースも、運転整理案の作成と実行に比較的に長い 450 秒を要したこととし、その間は各後続列車の抑止のみを行うとする。

図 5.5 に、運転線路変更を適用せずに作成した運転整理案を暫定運行計画後に挿入したダイヤである。次に、図 5.6 に示すのが、快速列車 105M を駅 E～駅 J で急行線に運転線路変更を適用したダイヤになる。この場合、105B は駅 E において着発線変更を行っている。

運転線路変更を適用された 105B は、障害発生時刻において駅 C～D を走行中であり、駅 D において暫定運行計画中は運転抑止されている。先にも述べた通り、この路線の駅 E において運転線路変更を適用するためには、着発線変更を行わなくてはならない。本来、駅 E においては、急行線側に普通列車が停車し、緩行線側に快速列車が停車して、緩急接続を行う。つまり、駅 E に普通列車が急行線側にいる場合は、105B に運転線路変更を適用することができない。このケースでは、幸い 105B が駅 E に到着する段階において、緩急接続の相手となる普通列車 1011C はすでに発車している。すなわち 105B は着発線を選ぶことができる比較的自由な状況となっている。

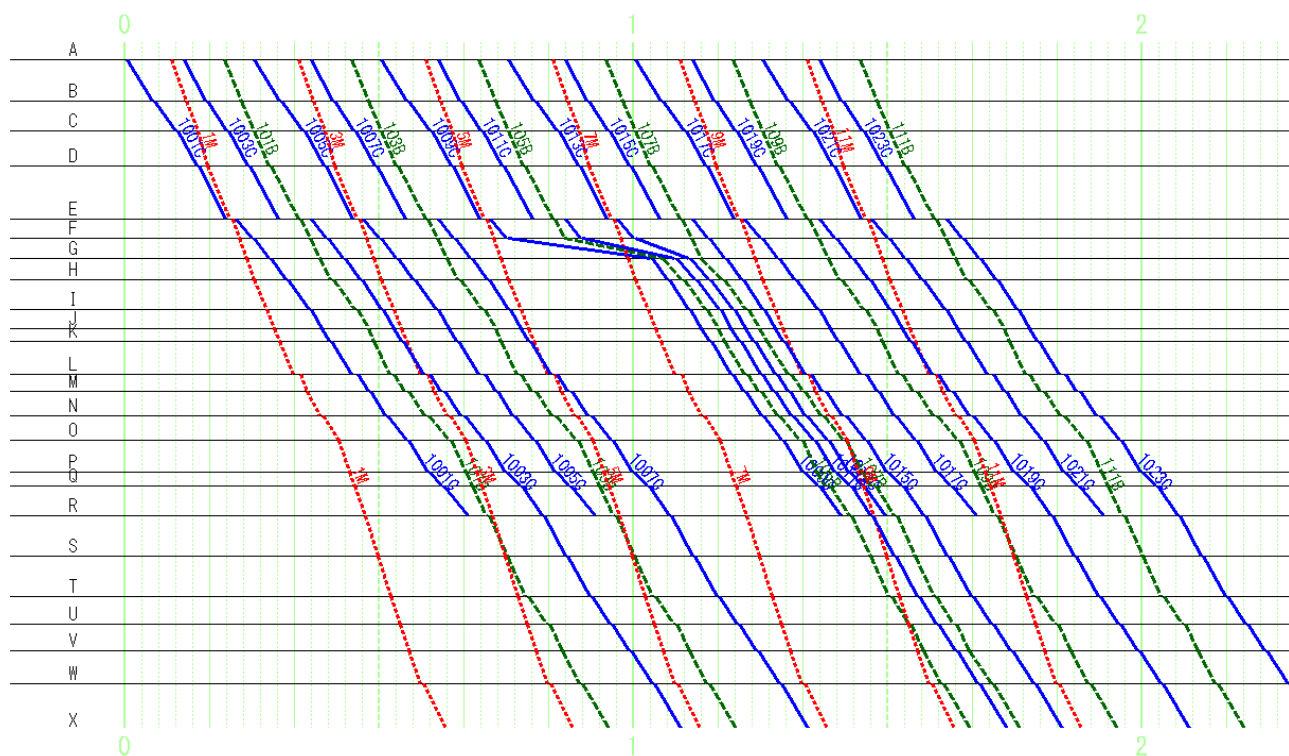


図 5.3 障害発生後のダイヤーF～G 間

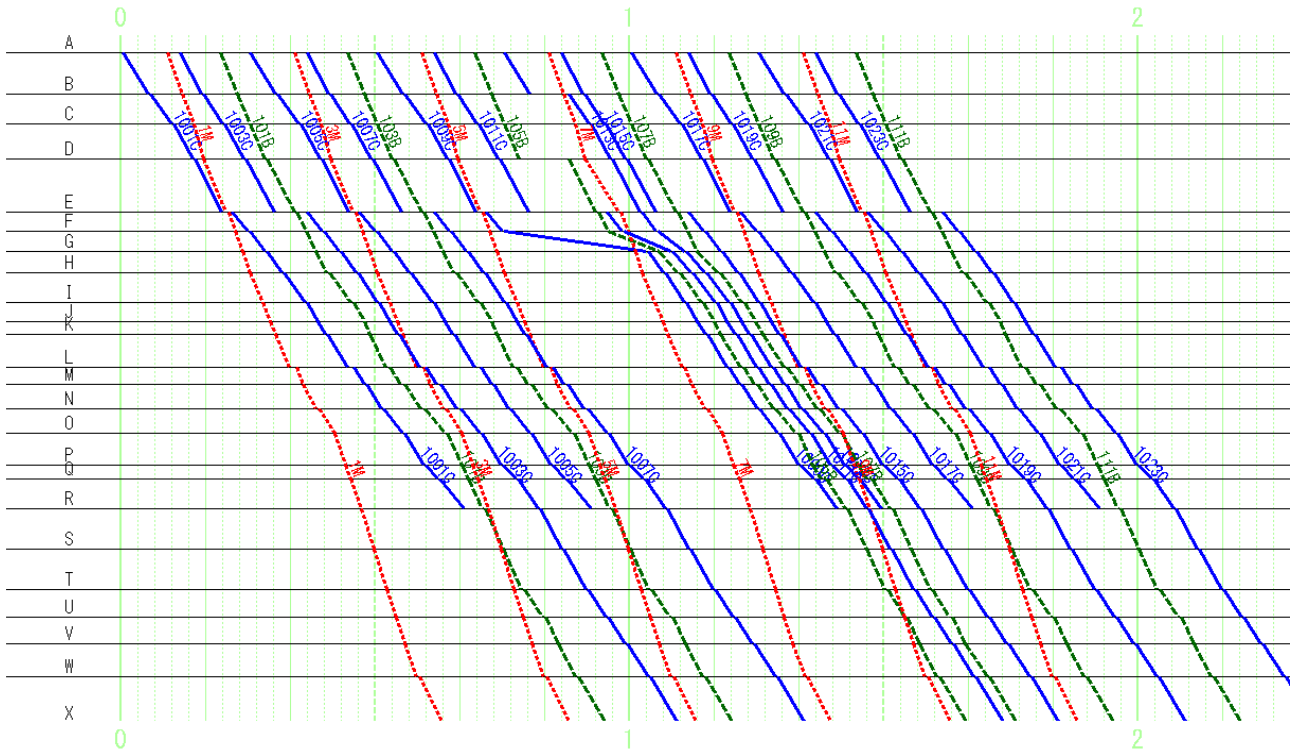


図 5.4 暫定運行計画を挿入したダイヤ

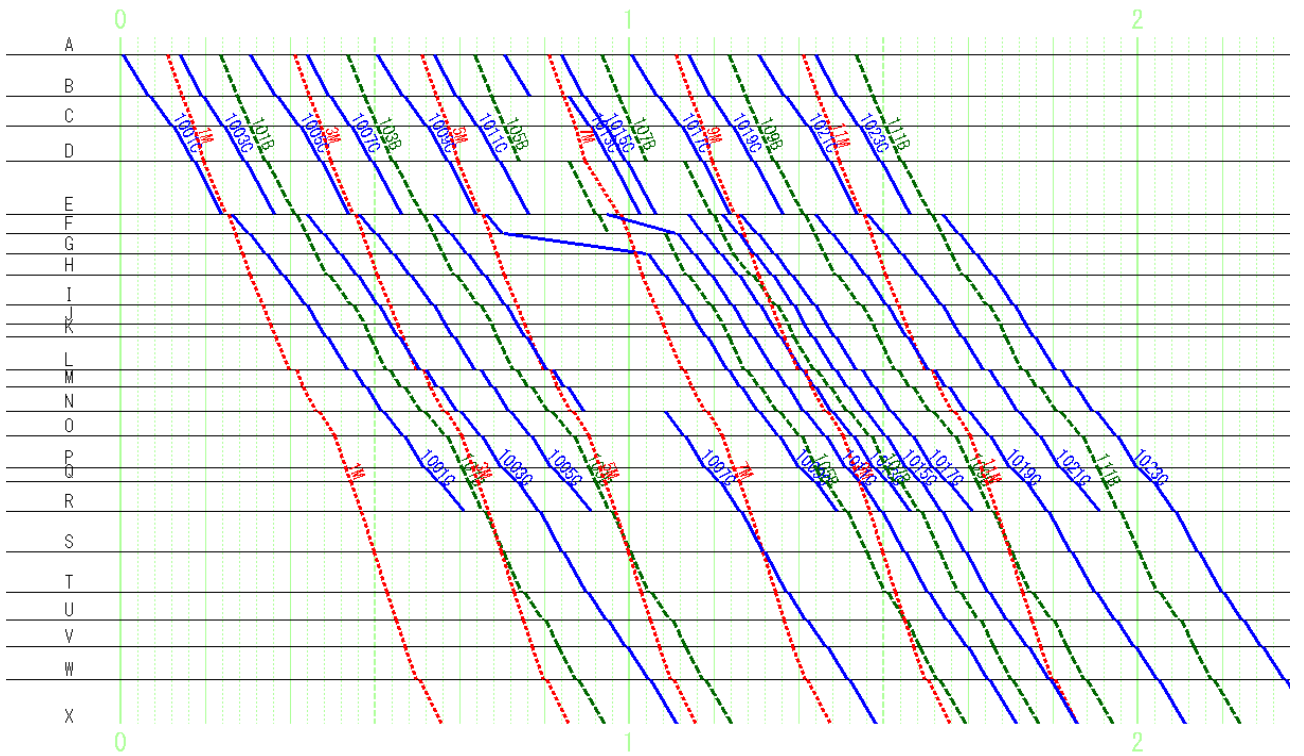


図 5.5 運転線路変更なし

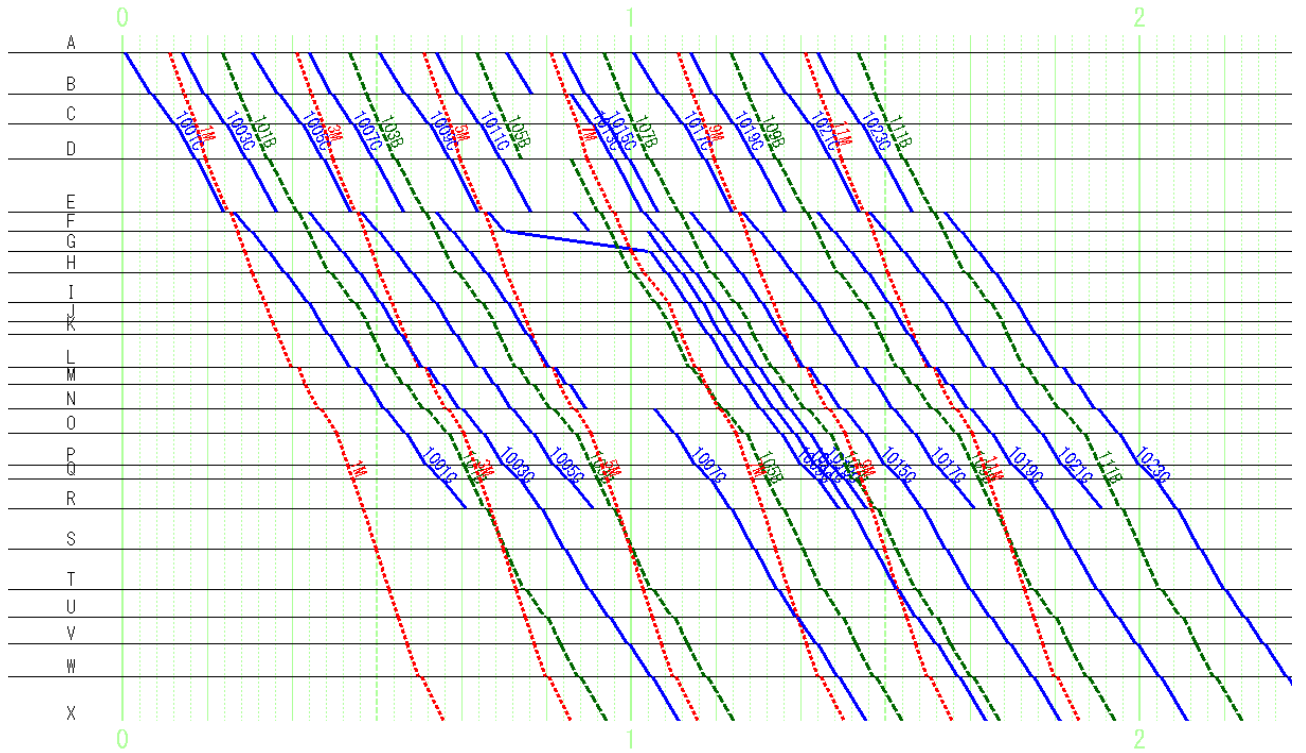


図 5.6 運転線路変更適用—105B

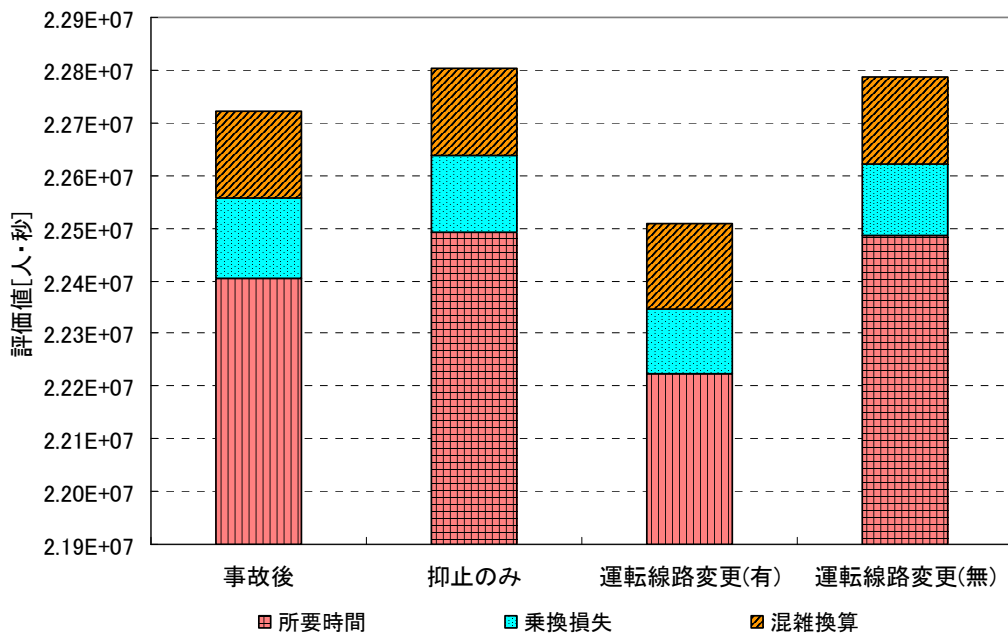


図 5.7 各ダイヤにおける評価値の比較

ここで、図 5.3～図 5.6 における各ダイヤの評価値の比較を行う。まず、その比較結果を図 5.7 に示す。この結果をみると、運転線路変更を行うことによって乗客の損失が減少している。特に、乗客の所要時間の減少が運転線路変更を行った整理案において、顕著に表れている。これは、障害が発生し運行が不能になっている区間において、快速列車 105B を運転線路変更することによって 105B の所要時間増加を抑えることが可能となり、図 5.5 に示す運転線路変更を行わない整理案よりも、図 5.6 に示す運転線路変更を行った整理案のほうがより乗客の損失が改善されたことを示している。具体的には、駅 E 以降に待っていた乗客を 105B の運行によって救済できたことが、乗客の総所要時間の減少、総損出の減少につながったと考えられる。

このように、運転線路変更を適用することによって、暫定運行計画後の整理案評価値の改善を図ることができた。これによって、暫定運行計画を含めた運転整理案全体の改善も図ることができた。以上より、運転線路変更は、運転整理案作成時間を考慮した場合においても、有効な運転整理手法になることがわかる。

5.4. 設備条件による運転整理への影響

前節において、運転線路変更の実装とその効果を示した。しかし、先に述べたように、運転線路変更は路線の設備的な制約によって、大きな影響を受ける可能性がある。前節においては、比較的自由的な状況下を対象として検討を行った。本節では、比較的線路の設備制約の厳しい状況下における運転線路変更による影響を検討する。また、そのうえで、各列車に対する乗客数を比較することによって、列車ダイヤの変更による評価値の変化の起因となるところの検討も行う。

5.4.1. 制約の多い状況下における運転線路変更

本節では、比較的自由度の低い状況下のケースを検証する。図 5.8 に示すのが事故後ダイヤである。普通列車 1009C が駅 G～H 間において 1000s の遅延が発生している。これまでと同様に、渡り線の配置箇所は、駅 E と駅 J、駅 N である。4 章で示した暫定運行計画を挿入したダイヤを図 5.9 に示す。今回のケースも、運転整理案の作成と実行に 450 秒の時間を要したこととし、その間は各後続列車の抑止のみを行った状態である。

図 5.10 に、運転線路変更を適用せずに作成した運転整理案を暫定運行計画後に挿入したダイヤを示す。次に、図 5.11 に、快速列車 107B を駅 E～駅 J で急行線に運転線路変更を適用したダイヤを示す。107B が外側線に割振られて、以降の到着時刻が早くなっていることがわかる。この場合、107B と普通列車 1015C は駅 E において着発線変更を行っている。

本来であれば、整理案開始時刻に駅 E で停車中の快速列車 105B に運転線路変更を適用できる可能性がある。先にも述べた通り、この路線の駅 E において運転線路変更を適用するためには、普通列車 1011C に着発線変更を適用せねばならない。しかし、先行する 1011C は、障害発生時刻において駅 D～E を走行中であり、駅 E において暫定運行計画中は抑止が行われる。暫定運行においては、抑止のみが行われるので、駅 E における着発線変更を行うことはできない。つまり、105B は駅 E の緩行線側に停車することになり、運転線路変更を行うことはできない。このように、このケースは運転整理の自由度が低い条件になっている。

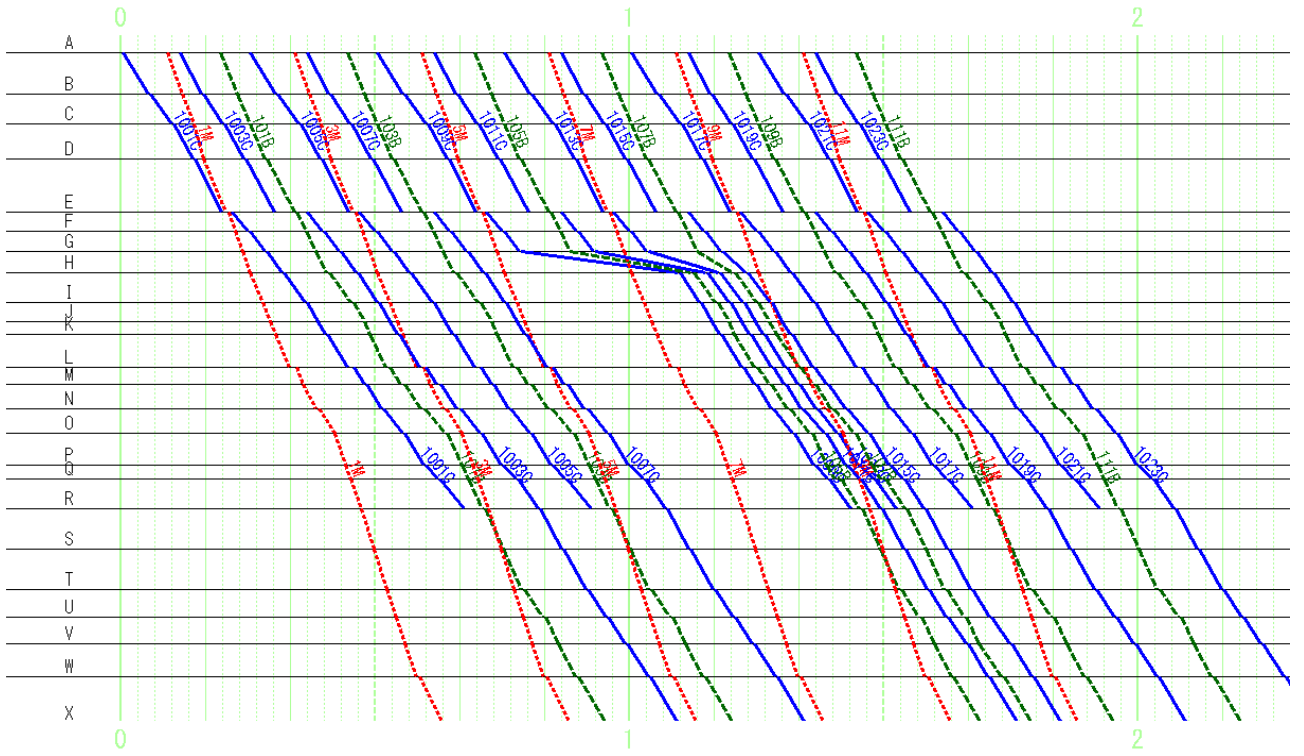


図 5.8 障害発生後のダイヤーG~H間

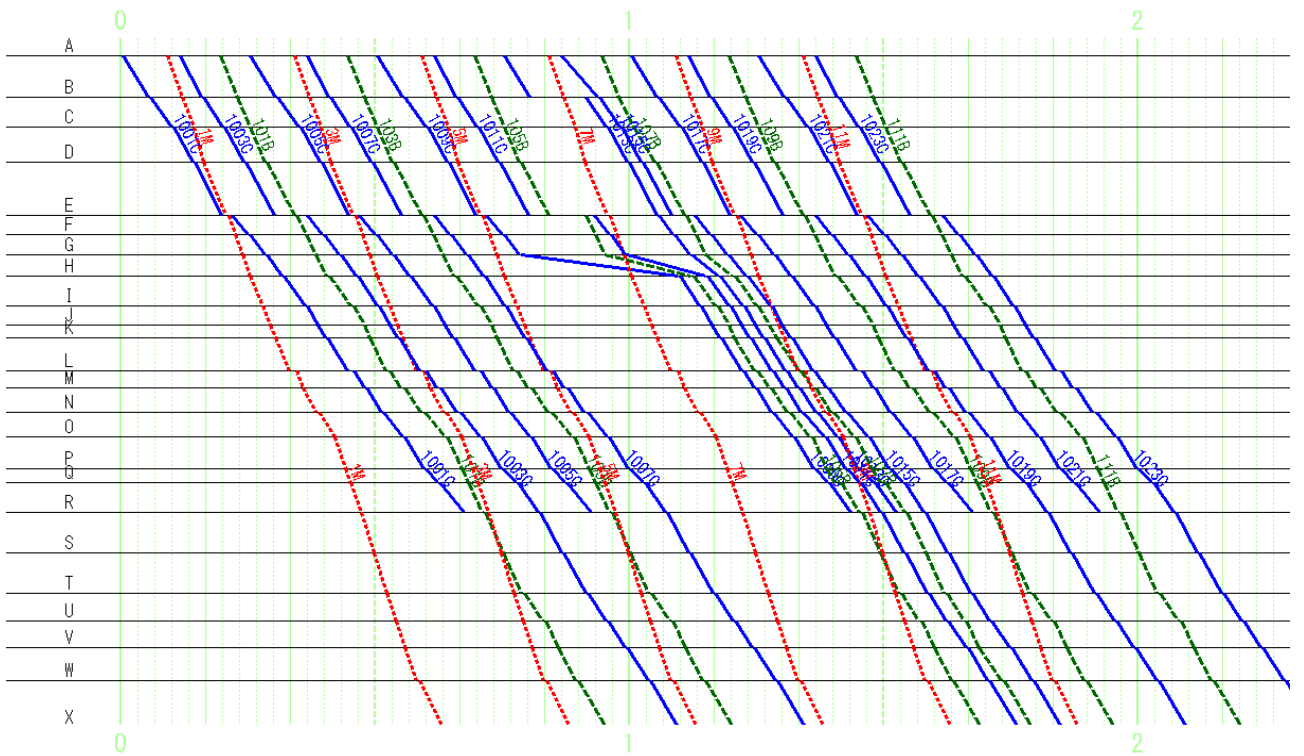


図 5.9 暫定運行計画のみ挿入

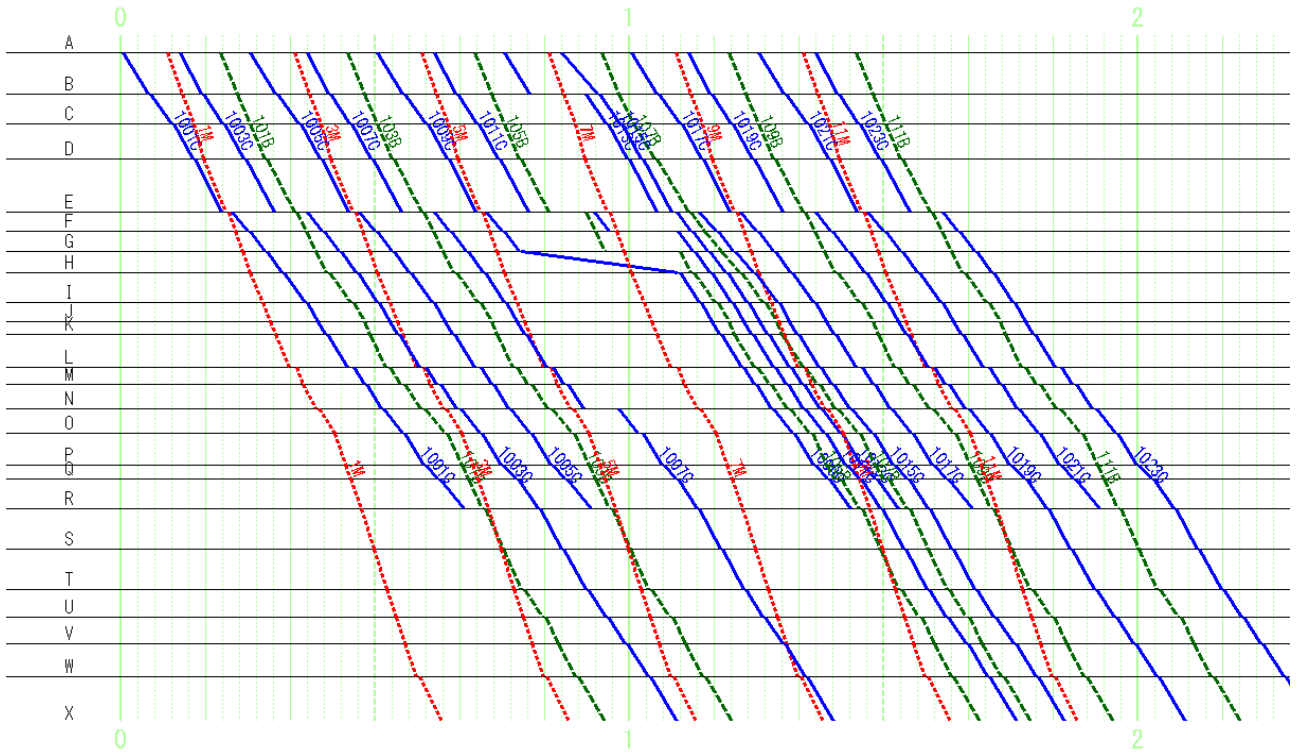


図 5.10 運転線路変更なし

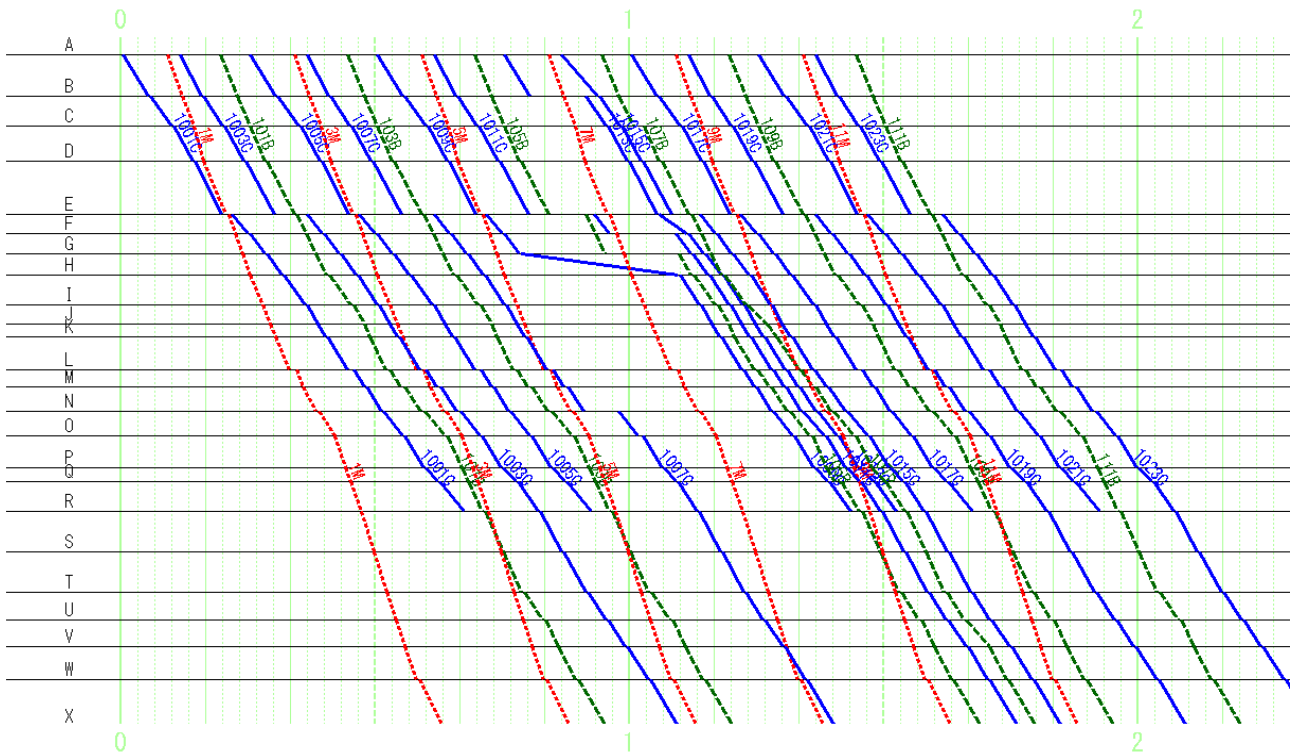


図 5.11 運転線路変更を適用—107B

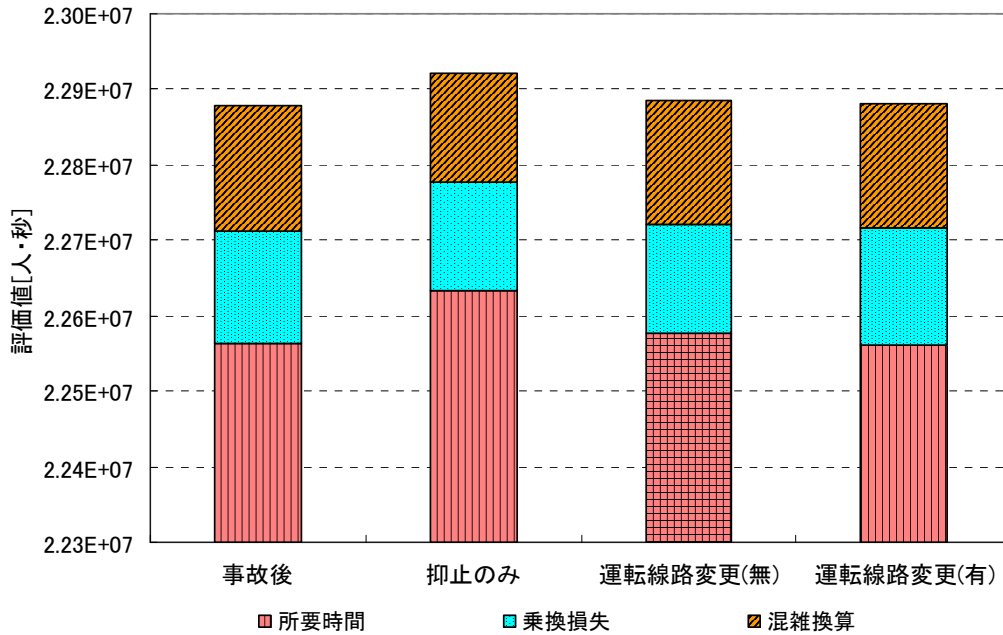


図 5.12 各ダイヤにおける評価値の比較

図 5.8～図 5.11 における各ダイヤの評価値の比較を行う。まず、その比較結果を図 5.12 に示す。この結果をみると、運転線路変更の有無による乗客の損失の変化を確認することができない。つまり、運転線路変更の適用によって整理の評価が改善されていない。運転線路変更を適用したものと、適用しなかったものを比べると、乗客の負担を大きく左右する所要時間の減少が僅かであることがわかる。その一方、運転線路変更を行うことにより、乗客の乗換損失が増大してしまっている。このことは、制約の多い状況下におけるの運転線路変更は、有効な運転整理手法になり得ないことを示唆している。

この原因を探るため、運転線路変更の実施によって影響を受ける普通列車 1013C、1015C、快速列車 107B、急行列車 9M における乗車人数の計算を行った。運転線路変更を適用した場合と、適用しなかった場合で比較したグラフを図 5.12～図 5.15 に示す。

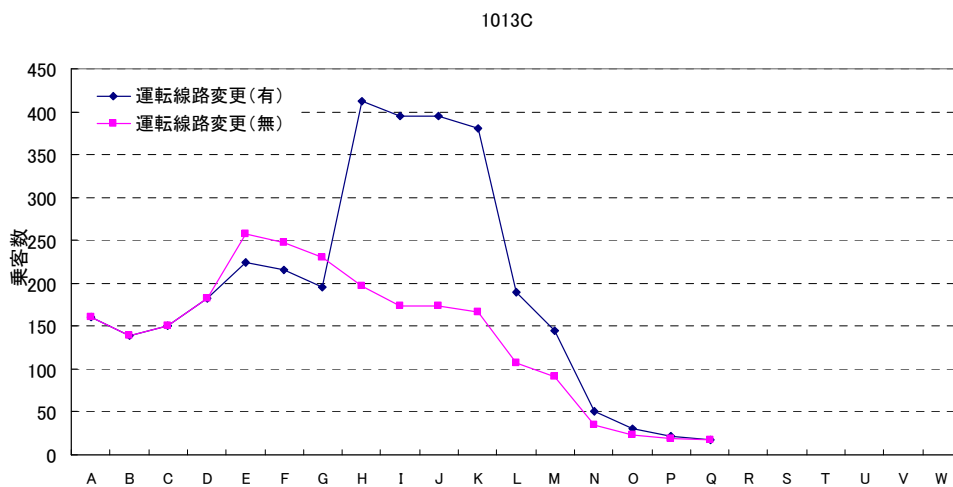


図 5.12 普通列車 1013C における乗客数

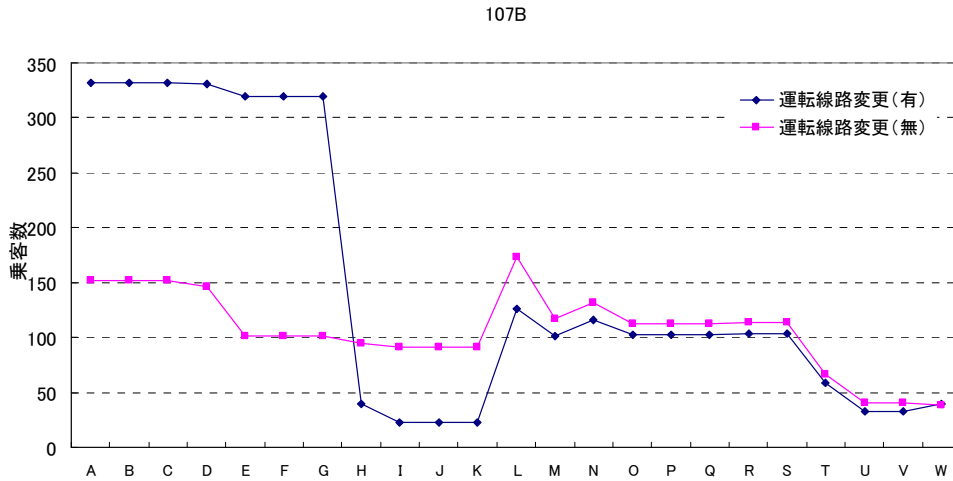


図 5.13 快速列車 107B における乗客数

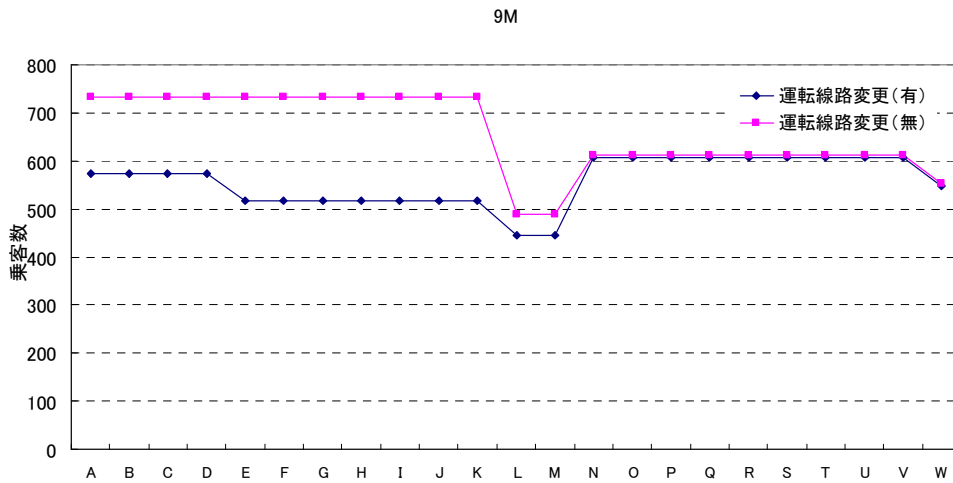


図 5.14 急行列車 9M における乗客数

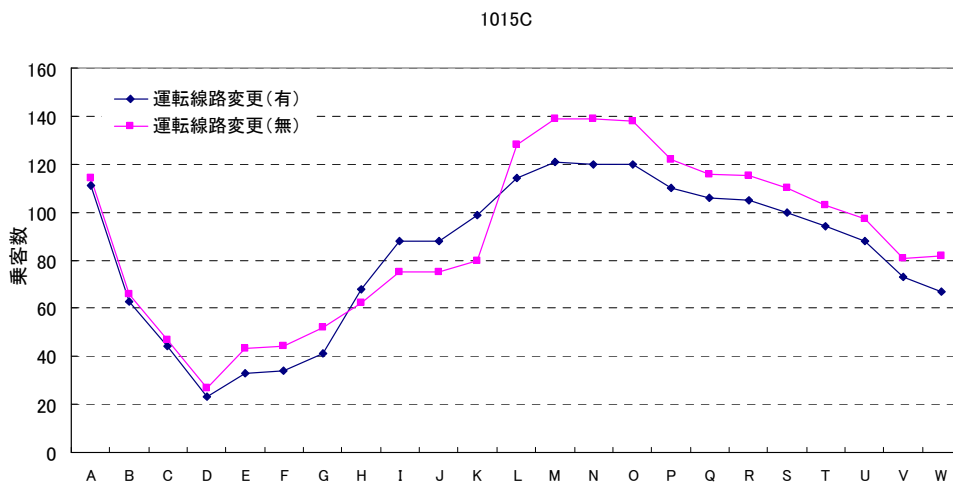


図 5.15 普通列車 1015C における乗客数

図 5.12 と図 5.13 より、駅 G～駅 H 間において、普通列車 1013C と快速列車 107B の間を乗客が移動していることがわかる。これは、駅 H において一時的に 107B が 1013C に追いつくことによって、1013C が先着する駅 I～駅 Q に向かう乗客が、1013C に乗換を行うためである。この 1013C と 107B の間を乗客が移動したことが、乗換損出を増大させたと考えられる。また、駅 A～駅 K 間において、急行列車 9M の乗客が減少したことも、107B を使って 1013C へ乗り継いだ乗客が増加したことを証明している。

このように、運転線路変更の効果が顕著でなかったのは、所要時間短縮のために多くの乗客が乗換を行い、乗換損失を増大させたからである。そして、所要時間短縮が大きくなかったことにもよる。これは運転線路変更を行った列車が、図 5.6 の場合と比べて運行密度の高い時間帯を走行していたことが原因である。つまり、線路設備上の制約によって、運転線路変更を適用する列車が、運行が過密な時間帯を走行する場合は、運転線路変更の効果は限定的である。これは、運転線路変更適用の判断に重要な基準となると考えられる。

5.4.2. 設備改良による運転線路変更への影響

運転線路変更が有効な整理手法にならないのは、対象列車の走行する時間帯の列車密度が高いためである可能性が高い。このことを検証するに、図 5.8 と同じ条件下で考える。さらに、運転線路変更の対象列車が、列車運行密度の低い時間帯に走行可能な状況をつくる必要がある。このために、対象路線への配線の改良も考慮する。

図 5.8 の状況において、運転線路変更によって運行密度の低い時間帯に走行可能な列車としては、快速列車 105B が該当する。しかし、整理案開始時刻において、105B は駅 E の緩行線側に停車している。駅 E の配線は、図 5.16 に示すように、緩行線側から急行線側に渡ることが構造上できない。これが、設備上の重要な制約になっている。そこで、この制約条件を解消するために、新たに図 5.16 に示す渡り線を追加した状況を考える。これによって、緩行線側に停車している列車も急行線側に渡ることができる。

新たな配線を作成した状態で、図 5.8 と同じ条件下で運転線路変更を適用した整理案の作成を行う。図 5.17 に示すのが、運転線路変更を適用した整理案である。これまでと同様に、運転整理案の作成に要する時間も考慮されている。快速列車 105B に運転線路変更が適用され、駅 E ～駅 J において急行線を走行している。駅 E の配線を変更したことによって、着発線変更を行わずに運転線路変更が可能になっている。

また、105B が走行している時間帯は、運行障害によって列車密度が低い状態になっている。具体的には、緩行線側の運行がない時間帯に、本来は緩行線を走行する 105B が急行線上を運行を行っている。図 5.11 における快速列車 107B の運行状況とは、対照的なものとなっている。

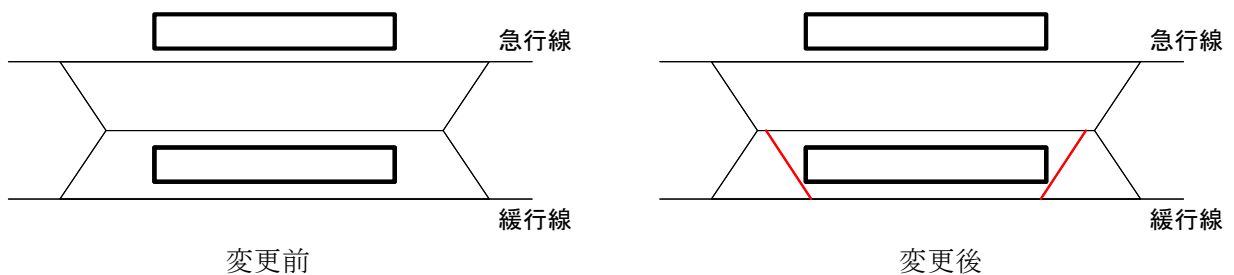


図 5.16 駅 E における配線の変更

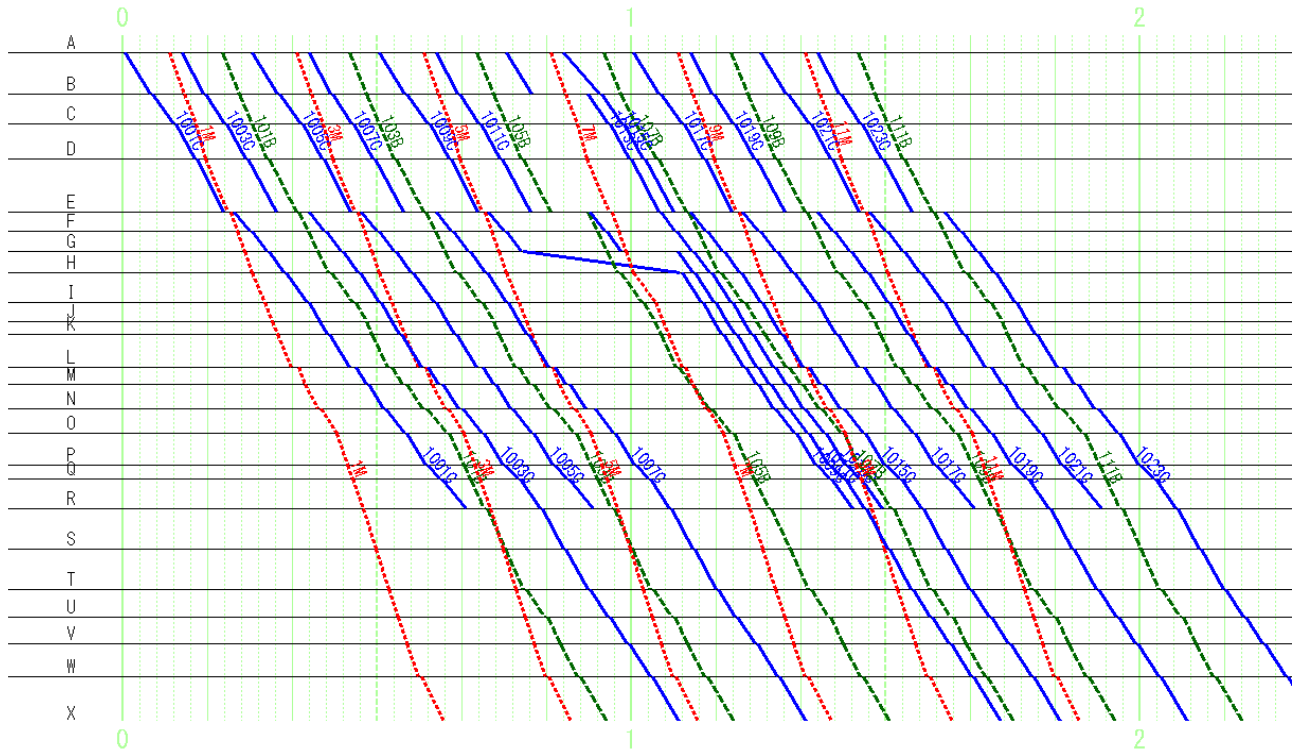


図 5.17 運転線路変更を適用 - 105B

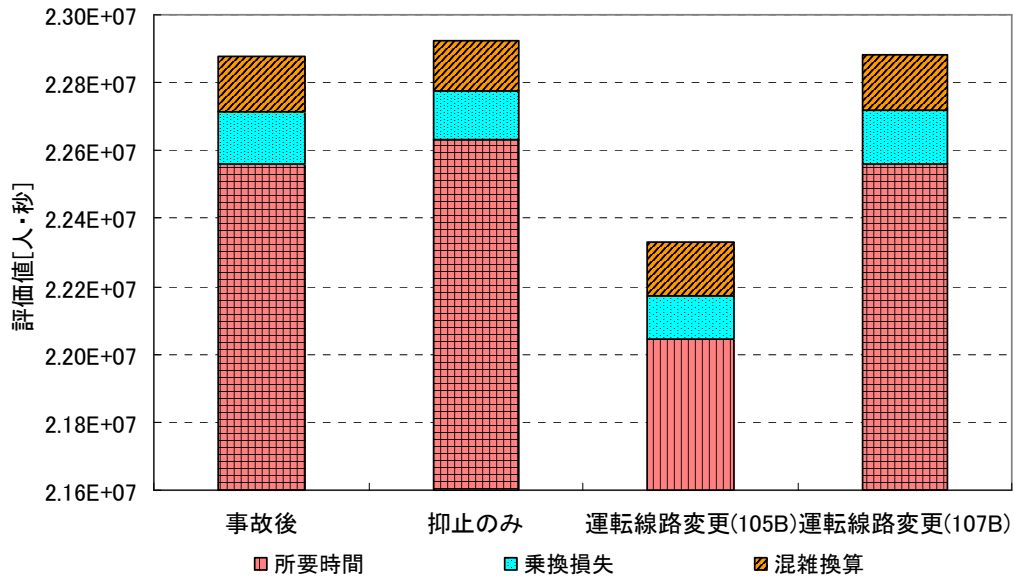


図 5.18 各ダイヤにおける評価値の比較

図 5.8、図 5.9、図 5.11、図 5.17 における各ダイヤの評価値の比較を行う。まず、その比較結果を図 5.18 に示す。この結果をみると、図 5.17 より快速列車 105B に運転線路変更を適用したことによって乗客の損失が大きく減少していることが確認できる。特に、乗客の所要時間の減少が運転線路変更を行った整理案において、顕著に表れている。これは、5.3 節で得られた傾向と似ている。つまり、運転線路変更適用の効果である所要時間の短縮が確認できた。

この結果は、設備制約を考慮しなければ、列車運行密度が低い時間帯に運転線路変更を行うことの有効性が高いことを示している。運転線路変更を適用することで、大きく改善することができる事項は所要時間の短縮である。各乗客に対して大きな所要時間の改善が見込めない、列車運行密度が高い時間帯における運転線路変更の効果が限定的であるのに対し、有効な運転整理手法になりえない。それに対して、各乗客に対して大きな所要時間の改善が見込める、列車運行密度が低い時間帯の運転線路変更は、有効な運転整理手法になる。

乗客数に対する影響の検証のため、運転線路変更の実施によって影響を受ける普通列車 1009C、1011C、快速列車 105B、急行列車 7M における乗車人数の計算を行った。運転線路変更を適用した場合と、適用しなかった場合でその人数を比較したグラフを図 5.19～図 5.22 に示す。

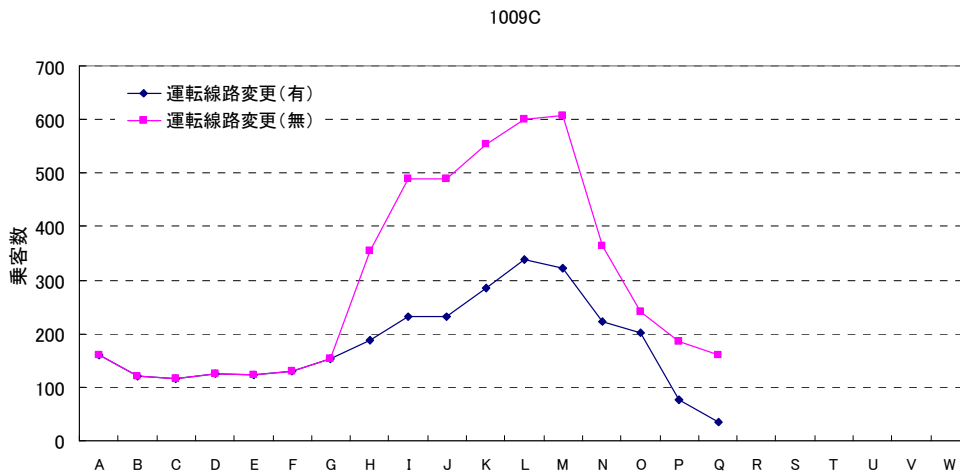


図 5.19 普通列車 1009C における乗客数

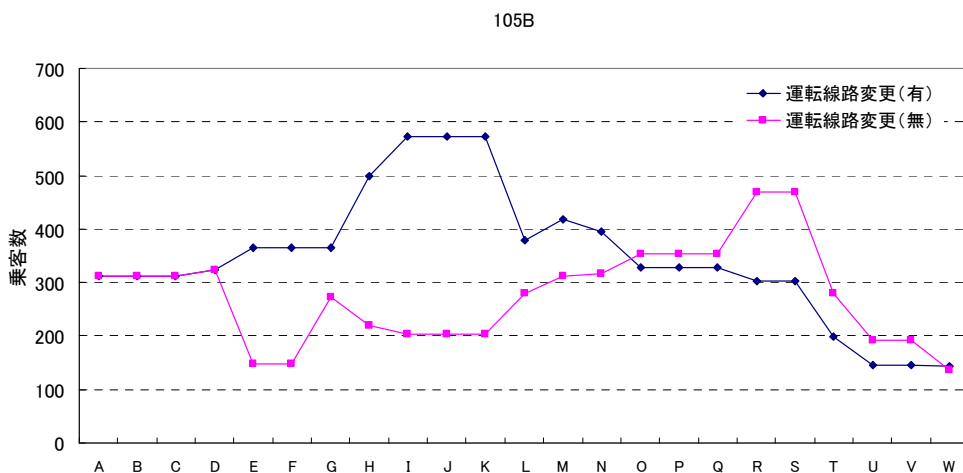


図 5.20 快速列車 105B における乗客数

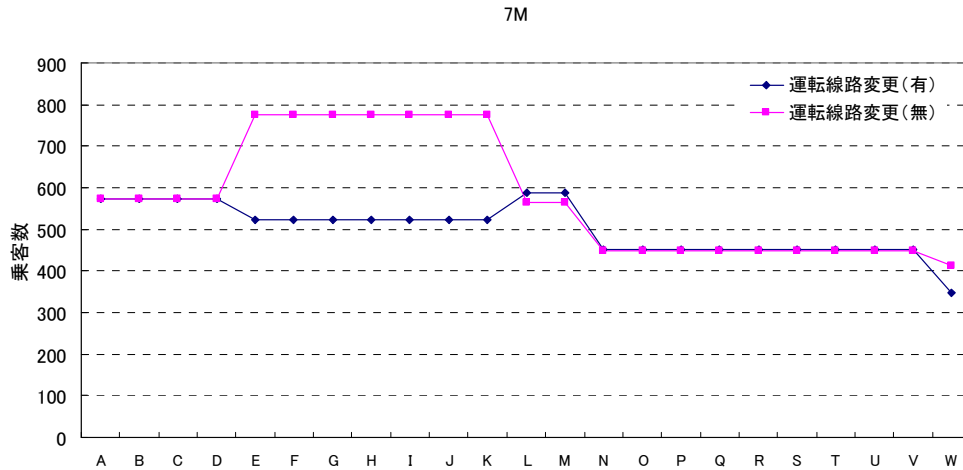


図 5.21 急行列車 7M における乗客数

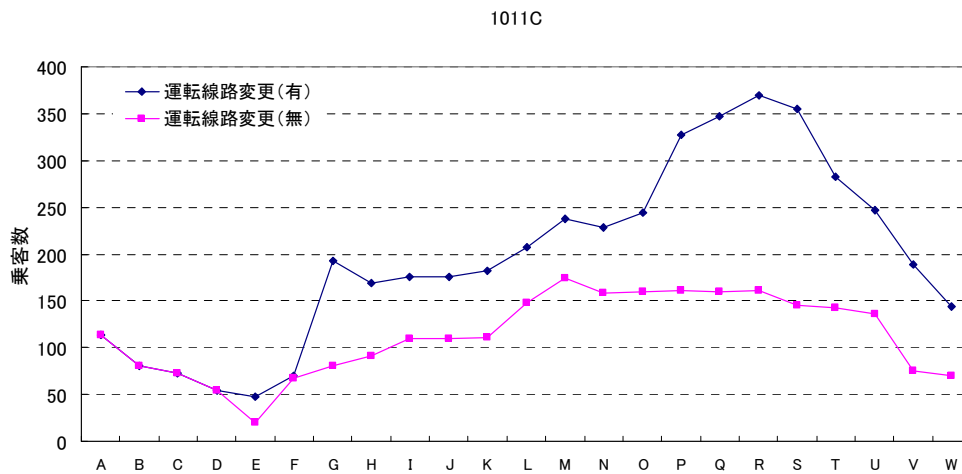


図 5.22 普通列車 1011C における乗客数

図 5.12 と図 5.13 より、駅 E～駅 J 間において運転線路変更を行うことによって、先行して運行した快速列車 105B の乗客が駅 E～駅 O で増大していることがわかる。これは、運転線路変更なしの状態においては先に行くことのできなかった普通列車 1009C、急行列車 7M の乗客がより早く目的地に到達できたと推測できる。実際に、1009C の駅 F～駅 R 間における乗客数が減少しており、7M の駅 E～駅 L 間における乗客数が減少している。運転線路変更を行ったことによって、105B は 1009C に対しては駅 H 以降の全区間、7M に対しては駅 L までの全区間において先着している。この所要時間の減少が、全体の評価値を大きく下げた原因である。

このように、路線の設備改良を行うことによって、運転線路変更の対象列車が運行密度の低い時間帯を走行できるようにした場合は、この手法の効果が大きくあらわれた。これは、5.3 節と同様に、比較的多くの乗客に対して所要時間の大きな短縮が実現できたからである。図 5.11 における結果と、今回の図 5.17 における結果を比較すると、運転線路変更の対象となる列車は、列車運行密度の低い時間帯を走行させる必要がある。以上の知見は、列車運行密度に応じ運転線路変更の適用判断を行う上で、重要な基準を与える。

5.5. まとめ

本章では、これまで抑止と時隔調整しか適用手法がなかった暫定運行計画後の主たる運転整理案に対して、より良い整理案を作成するための改良を行った。特に、本研究の対象となる方向別複々線区間における特長を生かした運転整理手法として、運転線路変更に注目した。運転整理案の作成時間を考慮しない先行研究^[8]において、運転線路変更は有効な運転整理手法であることが証明されていた。そこで、本章において、運転整理案の作成時間を考慮したシステムにおける運転線路変更の実装を行い、ケーススタディを通じてその有効性と各種の条件との関係を詳細に議論した。

まず、比較的自由的な状況下において、運転線路変更の適用を試みた。その結果、各乗客の所要時間を大幅に短縮することが可能な整理案作成が可能であった。つまり、運転線路変更を適用することによって、より良い整理案の作成が可能になることが証明できた。

しかし、路線の制約が存在する条件下においては、運転線路変更の効果が限定的なものになることがわかった。これに対して、同条件下で制約を解消した状態では、運転線路変更が運転整理案の改善に大きく寄与した。以上より、運転線路変更の対象となる列車が、列車運行密度の低い時間帯を走行する場合は、この手法の効果が発揮されやすいことが判明した。このことより、運転線路変更の適用の有無は、対象区間の列車運行密度と設備制約の両者を考慮し判断する必要があることが具体的に導かれた。

本システムを用いることによって、シミュレーションを通じて運転線路変更の適用時における設備的な制約と効果の関係を具体的に検討することが可能となった。路線上のボトルネックとなる点を、本システムの運転整理時のシミュレーションし、設備改善の費用対効果を数値的に検討することができる。

第6章

結論

6.1. まとめ

本論文では、運転整理支援システムにおける概要と、乗客流推定を用いた運転整理案の評価における基本的な概念について述べた。先行研究より、作成している運転整理支援システムの問題点として、障害発生時において存在する多くの事象を障害発生時刻に集約していたことがあった。この仮定の下では、多くの事象が無視された状態になってしまう問題がある。その対処手法として、本研究では運転整理案作成時間を考慮した乗客流推定を提案した。

運転整理案作成及び実行に要する時間を考慮した運転整理支援システムの拡張として、計画ダイヤと整理案の間に整理案の作成を表現した暫定運行計画の挿入することを提案した。これまで障害発生後の時刻に集約されていた事象を、2つに増加・分割することが可能になった。これによって、より時刻経過を考慮した現実的な整理案の作成が可能になった。だが、この暫定運行計画の挿入による所要時間の増大によって、これまでに比べて整理案の評価値が悪化してしまう傾向が見えた。そこで、暫定運行計画の改善方法として、「暫定運行案中も後続列車を運行」と「運転整理案開始時に列車が均等に配置」の2つの方法を提案・検証した。これより、始発駅付近で障害が発生した場合においては「暫定運行案中も後続列車を運行」の手法適用が効果的であること、始発駅から障害発生箇所が遠い場合においては「運転整理案開始時に列車が均等に配置」の手法適用が効果的である傾向が見えた。障害発生状況に応じて、暫定運行計画にどのようなパターンを適用するかを、簡単ルールに基づき変更する必要がある。

さらに、これまで抑止と時隔調整のみしか適用整理手法がなかった暫定運行計画後の主たる運転整理案に対して、方向別複々線区間における特長をいかした運転整理手法の適用を行った。先行研究^[8]において、方向別複々線区間における代表的な運転整理手法である運転線路変更の効果が証明されていた。そこで、運転整理案の作成時間を考慮したシステムにおける運転線路変更の実装を行い、ケーススタディを通じてその有効性と各種の条件との関係を詳細に議論した。この結果、運転線路変更の対象となる列車が、列車運行密度の低い時間帯を走行する場合は、この手法の効果が発揮されることが判明した。このことより、運転線路変更の適用の有無は、対象区間の列車運行密度と設備制約の両者を考慮し判断する必要があることが具体的に導かれた。

以上、本論文の成果によって、運転整理時において発生する事象をより厳密に考慮した、運転整理案作成に要する時間を考慮した運転整理案の生成が可能になった。また、運転線路変更などの運転整理手法を適用するうえの判断基準も示すことができた。

6.2. 今後の課題

本論文において、運転整理案作成に要する時間を考慮した運転整理支援システムにおける暫定運行計画における提案と、後方に適用される整理案にする運転整理手法の追加を行った。しかし、この暫定運行計画が、運転線路変更などの新たな運転整理手法を追加した主たる運転整理案にどのような影響を与えるかは未考慮である。この点において、2つのダイヤの相互関係をさらに検討する必要がある。

また、本システムの乗客行動モデルにおいては、全ての乗客はダイクストラ法によって一番良い経路だけを選んで行動するものとしている。この乗客行動モデルにおいては、混雑度などを無視して1つの経路に大量の乗客が集中する場合が存在する。これによって、積み残しなど問題が発生しうる可能性が存在する。この点の改善には、乗客行動モデルにおいてダイクストラ法の代わりに、任意の k 番目までの評価値となる経路が得られる k -th Shortest Path アルゴリズムを利用することが考えられる^[13]。 k 本のパスに対して確率的に分布する乗客モデルを適用することに、上記の問題を解決出来る可能性がある。

さらに、本研究において作成した運転整理支援システムは、運転整理を行う指令員を補助的な役割をすることが最終的な目標となっている。そのため、画面上に表示される情報をより分かりやすくする必要がある。本システムでは、各列車のダイヤ上における表示は可能であるが、各駅間における乗車数などを表示することはできない。この点などを改良し、使用者である指令員にとってよりわかりやすく使いやすいシステムにすることも重要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々から多大なるご支援、ご協力をいただきました。ここに深く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2年間、研究の進めうえでの方針の決定や共同研究の打ち合わせにおけるご助言、論文のチェックなどで数多くの点でご指導をいただきました。また、外部の企業見学や国際学会発表など多くの機会をご提供いただき、非常に貴重な経験をさせていただきました。誠にありがとうございました。

工学院大学の曾根悟教授、高木亮准教授、小籠亮太郎様、神山純一郎様、中尾弘幸様、田村麻季様、上智大学の宮武昌史准教授、渡邊哲治様、千葉工業大学の富井規雄教授、間宮健司様には運転整理共同研究会の場で大変お世話になりました。また、高木准教授、宮武准教授、富井規雄教授、工学院大学、上智大学、千葉工業大学の学生の皆様とは運転整理学生WGや勉強合宿において貴重なご意見をいただき、研究を進める上で大きな助けとすることができました。

また運転整理共同研究会では、西日本旅客鉄道株式会社の湯上佳治様、中村達也様、中根秀起様、鉄道総合技術研究所の福村直登様、長岡俊男様、平井力様、國松武俊様、JR総研情報システムの高場基司様をはじめとする多くの鉄道事業者や鉄道技術の専門家の方々から列車の運行や運転整理に関する様々な資料をいただきました。さらに、先行研究に関する紹介や現場からの貴重なご助言などをいただくとともに、現場を見学する機会を設けていただくなど多大なるご支援をいただきました。

本研究室における運転整理の研究の先輩である原和弘さんには、研究において作成しているプログラムやデータに関して多くのことを教えていただきました。さらに、研究の内容も含め、普段から多くのことを相談させていただきお世話になりました。多くの場面において、非常に感謝しております。運転整理グループの後輩である田中峻一君には、私自身が不得意であったプログラムの知識等に対して、多くの助言をいただきました。私が力不足によって大した支援もできない中、シミュレータのデータ作成や研究における議論の相手役などいろいろとありがとうございました。今後、彼の研究によって運転整理支援システムが更なる発展をとげることを期待しています。

野崎雄一郎さんには研究室の計算機環境整備の面で大変お世話になりました。福正博之さんには、ドイツに留学中も含め、非常にお世話になりました。研究室のムードメーカーとしていろいろとご尽力いただき、とても楽しい研究室生活をおくることができました。鈴木武海さんには、研究だけではなく多くの分野の知識をご教授いただき、非常に感謝しております。中田貴之さんには、大学院生活についての多くの情報をいただきました。

同期の小幡寛君、野田昂志君、Genevieve Marie Pattersonさんとは、研究の苦労や研究に対する議論を共に行い、時には研究室における息抜きするなど楽しい研究室生活を送ることができました。小幡寛君には修士1年次において研究室の懇親会のセッティングにおいて、中心的な役割を果たしてくれました。野田昂志君には、研究分野は同じく鉄道に関するものであったため、特に研究の内容について議論をさえていただきました。Genevieve Marie Pattersonさんには、私自身がチューターとしての役割を十分にできない中、英文のチェックなどをしていただき、本当にありがとうございました。

槻木澤佑公君には、研究室の懇親会のセッティングで尽力してもらいました。来年度以降の古関研究室を牽引する立場として、今以上に頑張ってもらいたいと思います。道念大樹君とは、原さん、中田さん、野田君も含め野球の話で盛り上がりました。川上千幸君には、研究室の懇親会における盛り上げ

役としてくれました。櫻井大輔君には、研究室における掃除係としてしっかりとした整備を行ってくれました。

留学生の **Martin Bacik** 君とは、短い間でしたが欧州の文化や自分の研究についての話などをすることができ、非常に良い経験になりました。

技術職員の高田康宏さんには研究室内の研究環境整備の点でご尽力いただきました。また、電気技術における技術的なことも含め、楽しく会話ができ、ことも非常によい思い出となっています。秘書の南佳子さんと松崎由香子さんには出張の際の事務手続き等でお世話になっただけでなく、楽しい会話で研究室の雰囲気を明るく盛り上げていただきました。また、松崎由香子さんには、研究旅行などの各イベントにおいて、その英語の能力をいかして **Genevieve Marie Patterson** さんとの会話の手助けをしていただきました。

最後に、大学及び大学院における生活を精神面、経済面において支えてくれた家族に感謝の意を表して、謝辞といたします。

平成21年2月4日

熊澤 一将

参考文献

- [1] 国土交通省 HP : 「平成 17 年度鉄道事故等の発生状況について」, 2006
- [2] 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
- [3] 富井規雄 : 「列車ダイヤのひみつ」, 成山堂書店, 2005
- [4] (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」, NTS (2005)
- [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.
- [7] 林良太郎・古関隆章 : 「都市圏鉄道における運転整理案の評価と効率的手法の提案」 電気学会全国大会, 4-234, pp.1578-1579, 2001
- [8] 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」, 東京大学 (修士論文), 2008
- [9] 富井規雄・田代善昭・田部典之・平井力・村木国満 : 「利用者の不満を最小にする列車運転整理アルゴリズム」, 情報処理学会論文誌:数理モデル化と応用, Vol.46, No.SIG2(TOM11), pp.26-28, 2005
- [10] 美谷邦章・家田仁・畠中秀人 : 「乗車位置選択行動モデルを用いた混雑費用の定量的評価法」, 土木計画学研究・論文集, No.5, pp.139-146, 1987
- [11] 安部恵介・荒屋真二 : 「最長径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
- [12] 原和弘・熊澤一将・古関隆章 : 「運転整理計算機支援のための列車運転乱れ時における乗客流推定」平成 20 年電気学会全国大会, 5-082, pp. 130-131 , 2008
- [13] Martins E. Q. V. , Pascoal M. M. B. , Santos J. L. E. : "The K shortest paths problem", Research Report CISUC, 1998
- [14] 國松武俊・平井力・富井規雄 : 「列車運行・旅客行動シミュレーションシステムの開発」, 鉄道総研報告, vol. 21, No. 4, pp. 5-10, 2007

発表文献

1. 原和弘, 熊澤一将, 古関隆章:「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」, 電気学会産業応用部門大会, 3-29, pp.III-211-216, Aug. 2007
2. 古関隆章, 原和弘, 熊澤一将:「列車運転小乱れ時の旅客流動解析に基づく旅客損失の計算と運転整理案の評価・提示」, スケジューリング・シンポジウム 2007, OS3-4, pp.85-90, Sep. 2007
3. 原和弘, 熊澤一将, 古関隆章:「運転整理計算機支援のための列車運転乱れ時の因果律を考慮した旅客流動推定法」, スケジューリング・シンポジウム 2007, OS6-1, pp.185-190, Sep. 2007
4. K. Hara, K. Kumazawa, T. Koseki: "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), 5-4, Nov. 2007
5. 熊澤一将, 原和弘, 古関隆章:「運行障害情報・伝達と整理案作成時間を考慮した乗客流推定」, 第14回鉄道技術連合シンポジウム, pp. 159-160, Dec. 2007, Tokyo
6. 原和弘・熊澤一将・古関隆章:「運転整理計算機支援のための列車運転乱れ時における乗客流推定」平成20年電気学会全国大会, 5-082, pp. 130-131 (2008)
7. K. Kumazawa, K. Hara, T. Koseki: "A Novel Train Rescheduling Algorithm for Correcting Disrupted Train Operation in a Dense Urban Environment", 11th Intl. Conf. on Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems (COMPRAIL2008), pp. 565-574
8. 熊澤一将・田中峻一・古関隆章:「方向別複々線区間における運転線路変更の効果」平成21年電気学会全国大会, Mar. 2009 (発表予定)
9. 田中峻一・熊澤一将・古関隆章:「複数経路を考慮した運転整理計算機支援のための乗客流推定法」平成21年電気学会全国大会, Mar. 2009 (発表予定)
10. S. Tanaka, K. Kumazawa, T. Koseki: "PASSENGER FLOW ANALYSIS FOR TRAIN RESCHEDULING AND ITS EVALUTION", The International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2009, June 2009 (発表予定)

付録

評価ツールとしての乗客流解析

1. 乗客流解析シミュレータの汎用性

本研究で作成している運転整理支援システムの概要を簡潔に示したものを、Fig.1 に示す。第2章で述べた通り、本システムは整理案の作成部分と整理案の評価部分の2部構成になっている。そのため、プログラムを改良することによって、この2つを分割して整理案の作成機能のみをとしての使用も可能である。また、その逆として、入力された整理案またはダイヤの評価のみを行うことも可能である。

本研究の特長として、列車ダイヤを乗客の視点から見たダイヤの評価を行うということがある。これは、乗客行動シミュレーションを用いて乗客の動きを推定し、乗客の受ける損失の総和を評価値とする。この評価値が小さいほどよいダイヤと判断するものである。この特長の基幹をなすのが、Fig.1 に示すシステム上の整理案の評価部分である。このダイヤの評価部分は、以下に示す利点を持つ。

- ・乗客流動を考慮したシステムである。
- ・OD データをベースとした入力ダイヤに対して、乗客流を高速に推定できる。
- ・乗客の視点からみた評価値である総損失時間を出力可能である。

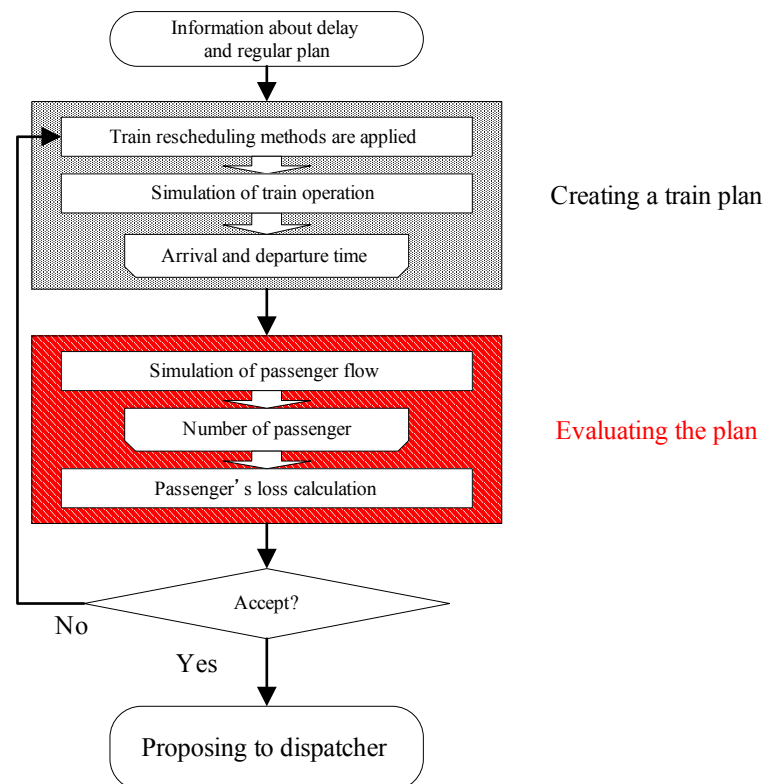


Fig. A.1 Flow chart of train rescheduling system

先に述べたプログラム入力と出力の整合性をとることで、第三者が作成したプログラムによって生成されたダイヤを本システムにおいて評価することが可能になる。本システムの運転整理案の作成部分における適用手法は少なく、高度な運転整理案の作成は完全ではない。だが、ここに他のシステム、または指令員などによって作成されたダイヤを、本システムを用いて高速に評価もできる。

この評価の流れを Fig.2 に示す。この例における本システムは、第三者によるスケジュール作成プログラムにより作成されたダイヤデータと各駅における着発時刻や各列車の列番などを dat ファイル形式で入力することによって、あらかじめ入力されている OD データより各列車における乗車数と評価値を算出している。乗客流解析機能のない整理案作成シミュレータを、有効に評価するツールとなりうる。

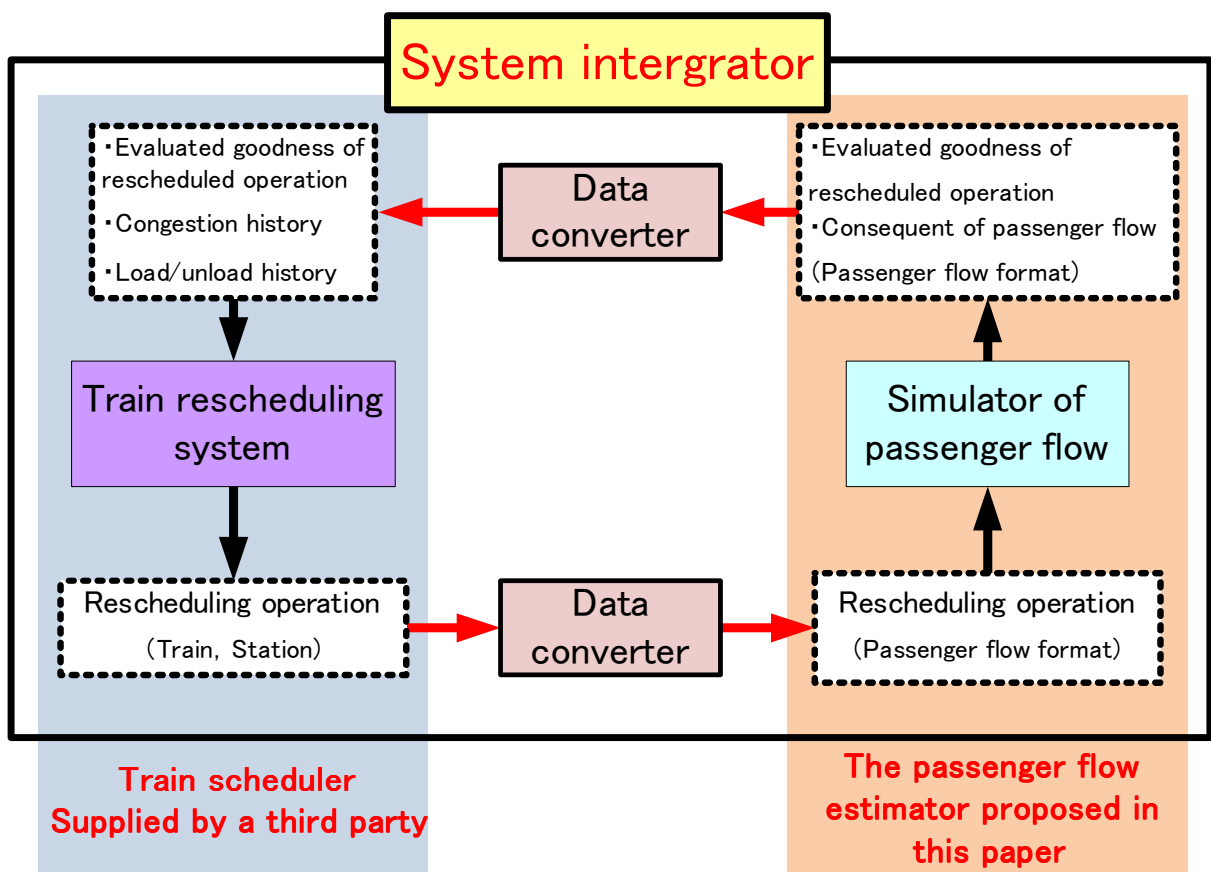


Fig. A.2 Example of train simulator

2. 評価ツールとしての適用例

実際に、外部において作成した計画ダイヤを、本システムに入力した例を Fig.3 に示す。このように、入力したダイヤを表示・評価することが可能である。ここで評価を行ったダイヤは、30 駅ある路線の約 8 時間の上下線におけるダイヤである。本システムは汎用コンピュータ (Intel Core2 Duo プロセッサ 3.0GHz, 2.0GB RAM, Windows XP OS) を用いて、約 45 秒程度で各列車における乗車数と評価値の算出している。各列車における乗車数と評価値の算出結果の一部を Table.1 に示す。

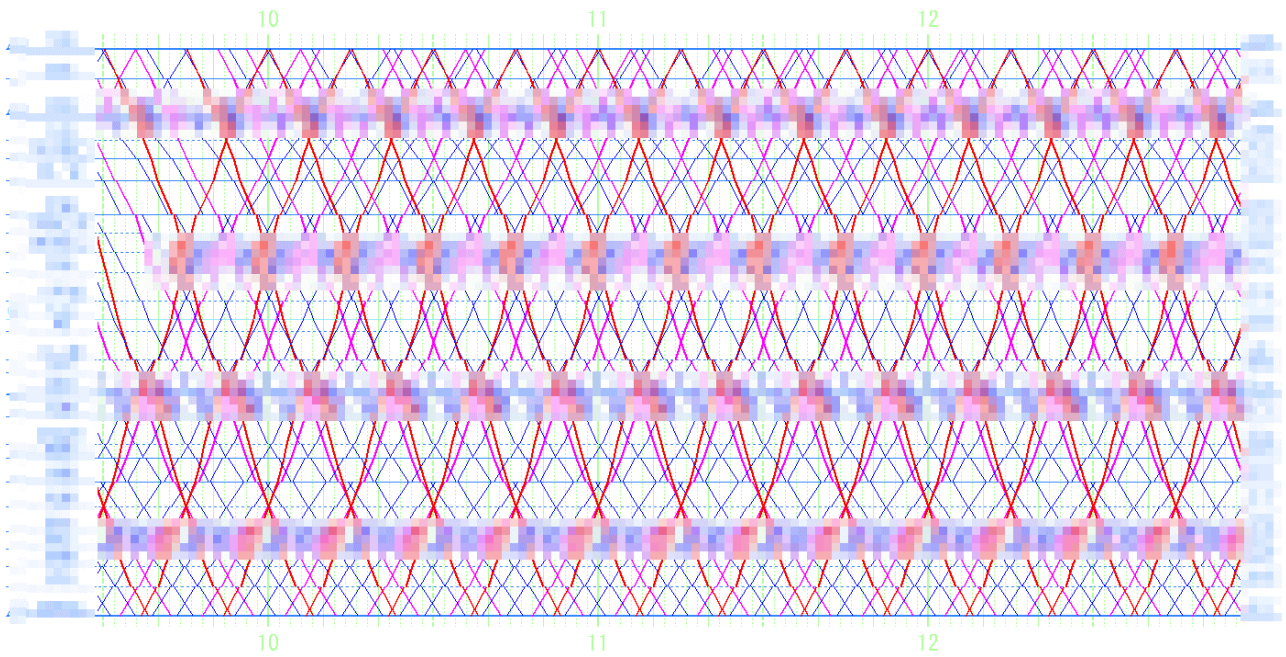


Fig. A.3 Example of train schedule

Table. A.1 Output data

(a)Evaluated goodness of train schedule

所要時間	乗換損失	混雑損失	総損失
2.66E+08	86351.3	330110	2.66E+08

(b)Consequent of passenger flow

列車番号	乗車駅	降車駅	乗客数
159030	21	22	0.672338
159030	21	23	5.3787
159030	21	24	7.14005
159030	21	25	2.14201
159030	21	26	1.39861
159030	21	27	2.7713
159030	21	29	1.41944
159030	21	30	0.699306
159030	21	31	0.699306
159030	21	34	4.84977
159030	21	35	0.699306
159030	21	36	2.07847
159030	21	37	0.699306
159030	21	40	0.699306
159030	21	43	0.699306
159030	21	45	0.692824