

— 修士論文 —

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

Generation Method of Tentative Operation Plan for Train Rescheduling System
Based on Passengers' Flow Analysis under Consideration of Multi-Paths

平成22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 情報理工学系研究科
電子情報学専攻 修士課程
学籍番号 48-086416

田中 峻一

内容梗概

鉄道において列車の運行が乱れた際、列車のダイヤに変更を加え元のダイヤに収束させる運転整理業務が行われる。現在の運転整理は、確立したアルゴリズムや定量的な評価がなく、経験のある指令員の判断に頼る部分が大きく、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案作成支援システムの開発を行っている。

本研究では、乗客の視点に立ったダイヤ評価を適切に行うために、乗客の行動仮定の見直しの提案を行い、その影響について考察を行う。また、障害発生直後の列車運行はどうすべきかについて複数のパターンを考え、パターンの選択法について言及する。

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	運転整理ダイヤ案作成部の概要	5
2.2.1	運転整理手法の適用	5
2.2.2	主な運転整理手法	5
2.2.3	列車運行シミュレーション	8
2.2.4	列車運行上の主な制約	8
2.3	運転整理ダイヤ案評価部の概要	10
2.3.1	乗客の立場から見た定量的評価	10
2.3.2	乗客行動シミュレーション	12
2.4	本研究で用いるモデル路線	14
第 3 章	複数経路を考慮した乗客流推定	16
3.1	従来の乗客流推定	16
3.2	乗客流推定における複数経路の導入	17
3.2.1	k -th Shortest Paths アルゴリズムの導入	18
3.2.2	拡張 Dijkstra 法の導入	19
3.2.3	乗客の選択確率	20
3.3	モデル路線における複数経路導入の効果の検証	20
3.3.1	通常ダイヤを用いた場合	21
3.3.2	運転整理案を用いた場合	23
3.3.3	混雑度の高い区間での影響	26
3.4	まとめ	26
第 4 章	暫定運行計画の運行計画パターン	29
4.1	整理案作成時間及び時系列を考慮した運転整理	29
4.2	暫定運行計画の導入	30
4.2.1	因果律を考慮した乗客流推定	30
4.3	暫定運行計画の運行計画パターン	31
4.3.1	後続列車を次駅で停止させる	31
4.3.2	全列車を次駅で停止させる	32

4.3.3 駅間停車を回避しながら運行を継続する	32
第 5 章 暫定運行計画における運行計画作成法	34
5.1 停車時間増加に対する乗客の損失の変化	34
5.2 暫定運行計画中の抑止における影響	36
5.3 モデル路線による暫定運行計画決定法の検証	40
5.3.1 モデル路線によるシミュレーション条件	40
5.3.2 モデル路線によるシミュレーション結果	41
5.4 まとめ	42
第 6 章 結論	44
6.1 まとめ	44
6.2 今後の課題	44
参考文献	46
本研究に関する発表論文	47
謝辞	48
付 録 A MPS Algorithm	49
A.1 MPS アルゴリズムの概要	49
A.2 MPS アルゴリズムの証明	50

第1章 序論

1.1 研究の背景

鉄道は、他の交通手段と比較して、大量輸送、環境への配慮、安全性、定時性などの点において優れた特性を持っている。しかしその一方、鉄道は予め設置された軌道上を走行することから、鉄道の運行にはその運転に対し様々な制約が存在する。

鉄道は、多くの制約の下で安全で高速・高密度な輸送サービスを提供するために予め計画されたダイヤに従って運行される。ダイヤは該当する線区の需要に応じて定期的に改正され、このダイヤに基づいて信号機やポイントを制御して運行することにより、複数の制約を満たし、良質なサービスを提供している。

日本の鉄道は、他国の鉄道と比較すると定時性が極めて高いことで知られている。しかし、事故や天候、設備の故障など様々な原因で予め決められたダイヤ通りに運行することができないことがある。図 1.1 は、我が国における輸送障害の件数を表したものである [1]。輸送障害とは運休または 30 分以上の遅れが出た場合を指し、その遅れの原因別に応じて、災害原因（地震などの災害や天候の影響によるもの）、部外原因（旅客の線路内立ち入りなどによるもの）、部内原因（設備故障や係員の取り扱い誤りによるもの）に分けられる。近年では、ホームドアの設置、線路の高架化、車両や設備技術の高度化により、障害を防ぐための策がとられているにも関わらず、この 20 年間輸送障害の件数は増加傾向にあり、1987 年には 1842 件であった輸送障害が、2008 年は 4191 件もの輸送障害が発生している。

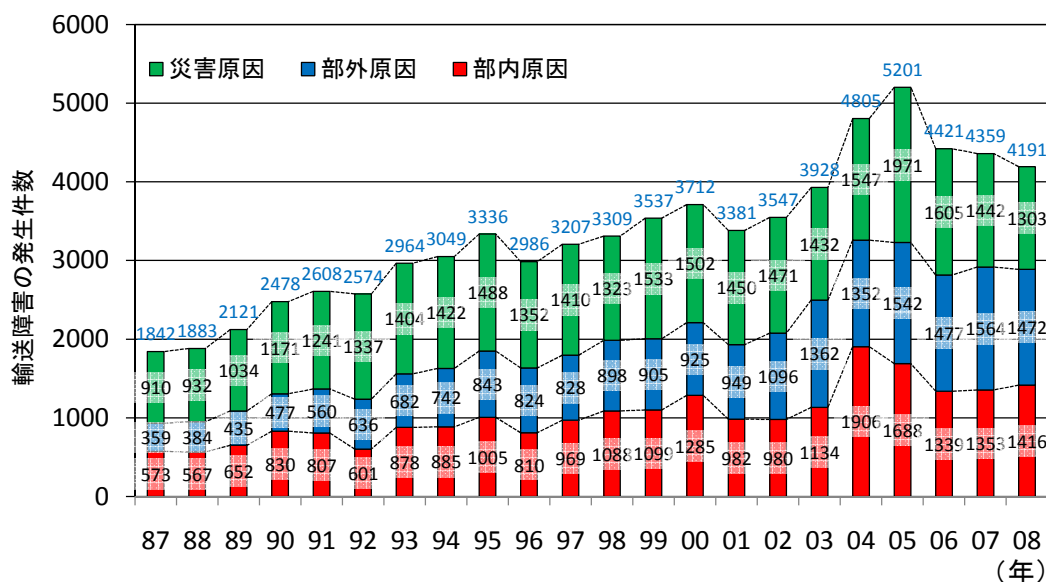


図 1.1: 日本における輸送障害の件数の推移

ダイヤ通りの運行ができなくなると、新たに列車の運行計画を立てなければならない。この運行計画を一時的に変更して元のダイヤに戻す作業を「運転整理」と呼ぶ [2]。

現在の運転整理の業務は長年に渡り経験を積んだベテランの指令員の手作業によって行われているが、運転整理は以下のような理由から鉄道に関する業務の中でも極めて難しいものとされ、指令員に大きな負担がかかる作業である。

- 情報伝達

障害発生の現場から指令員への情報の伝達や、指令員から関係する駅員・車掌・運転手へ伝達することは異常時には非常に困難となる。首都圏では、携帯回線やデジタル列車無線を用いて指令員からの情報を運転台に伝えるシステムが導入されているが、未だ十分であるとは言い難い。

- 評価手法

現在の運転整理では、これまでの運転整理の経験と培われた勘により行われているため、定量的な評価が存在していない。また、鉄道のネットワークは複雑化しており、その中での経験の上で運転整理案を決定するため、運転整理を行う技術を習得するには年月がかかり、技術の継承が難しい。

- 問題の複雑性

運転整理にはいくつもの手法が存在しており、手法を適応列車や箇所の組み合わせが膨大にあり、すべての組み合わせを考えることは現実的に不可能であると考えられている。また、その手法それぞれに対し、列車運行上の制約を考えなければならない。近年では、他線区・他社間との乗り入れが頻繁に行われており、その影響も考慮しなければならないため、問題は更に複雑化している。

- リアルタイム性

状況が時々刻々と変わるため、運転整理案作成中にも復旧見込みが変化がすることがある。また、運転整理に時間がかかってしまえば運転再開の時刻が遅れるだけでなく、再度運転整理案を作成しなければならない。

そこで、運転整理の高効率化及び高品質化のために、指令員の運転整理業務を支援するような計算機によるシステムが求められている [3]。

1.2 研究の目的

先行研究 [4][5] 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、本システムは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いる。これまでの研究で、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する乗客行動シミュレーションを利用して、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。

本研究では、評価を行う際に用いる乗客行動シミュレーションにおける乗客の行動仮定の見直しを行う。先行研究では、乗客は所要時間と乗換を考えた不効用が最小となるような経路を選択すると仮定している。しかし、この仮定のもとでは乗客は一意的な行動のみを取るため、運行頻度が一定にならない障害発生時のダイヤを考える際に一列車に乗客が集中してしまう現象が発生する。そのため、本研究では乗客の行動を複数の経路から確率的に選択するモデルを用いて、乗客流の見直しを行う。また、通常のダイヤにおいても混雑を回避しようとする乗客もいるため、このモデルを考えることは現実的であると言える。

また、運転整理案を作成する部分においては先行研究 [7] において、運転整理案を作成する時間を考慮した手法が取られた。具体的には、障害が発生した時刻と運転整理を開始する時刻に注目し、障害発生までのダイヤと運転

整理ダイヤの間に適用する暫定運行計画の作成・挿入が行われている。[6] では、この暫定運行計画においてすべての列車を抑止させるか、部分的に運行を続けるかについての判断に関して考えられていなかった。そこで、本研究では暫定運行計画の間の運行パターンを考え、それらの運行パターンの適用判断についての検証を行う。

以上の変更を考慮することにより、より現実的な運転整理支援システムの作成を本研究の目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文は 6 つの章から構成されており、本論文の第 2 章以降の構成を以下に示す。

はじめに、第 2 章において先行研究から引き継いだ運転整理支援システムの構成を述べ、以後のシミュレーションで利用するモデル路線の特徴について述べる。第 3 章では、運転整理の評価の部分に注目し、乗客の行動モデルの変更により評価にどのような影響が現れるかについて述べる。第 4 章では、先行研究において的確な運行方法が考えられていなかった障害発生直後に運転整理案ができるまでのより良い運行方法について、時系列を整理した上で、複数の運行パターンを示す。第 5 章で、第 4 章で示した運行パターンの適用基準方法を提案し、モデル路線において提案手法と実際に各運行計画パターンを実施した結果との比較・検討を行う。

最後に、まとめと今後の研究課題を第 6 章にて述べる。

第2章 運転整理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支援システムの概要について述べる。まず、運転整理支援システム全体の構成を述べた後、運転整理のダイヤ案を作成する部分と作成されたダイヤ案を評価する部分とに分けて説明する。また、本研究で用いるモデル路線についても説明する。

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図 2.1 に示すような構成である。大きく分けて運転整理案の作成部と、運転整理案の評価部の 2 つの部分から構成される。

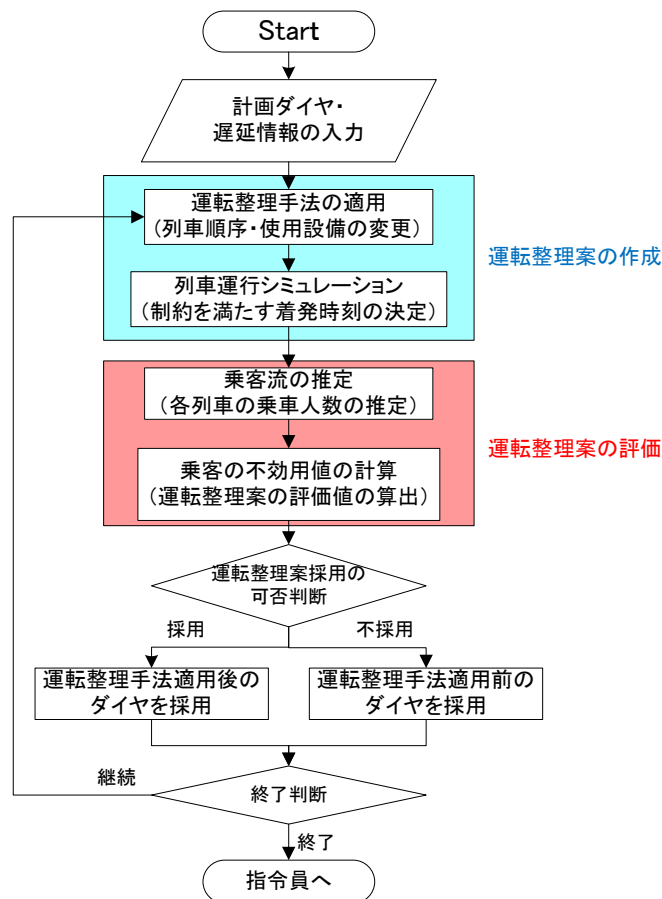


図 2.1: 運転整理支援システムの構成

まず、システムは計画ダイヤと遅延情報を受け取り、運転整理を何も行わずに順番に列車を詰めただけのダイヤを作成し、その評価値を算出する。その後、ダイヤ案の作成部で各運転整理手法を適用し、ダイヤの一部が変更

され、列車運行シミュレーションで運行上の制約を満たすように列車の各駅での着発時刻を決定する。その着発時刻を基に、ダイヤ案の評価部で乗客の流れをシミュレーションをし、乗客の不効用を基準とした評価値を算出し、算出された評価から、適用するかどうかを決定する。

この、ダイヤ案作成、評価、有効性の判断のループを各運転整理手法に対して行い、最終的に複数の運転整理手法を組み合わせた整理案を作成し指令員に提示する。

作成部、評価部の詳細をそれぞれ次節以降に示す。

2.2 運転整理ダイヤ案作成部の概要

運転整理支援システムでは、通常時のダイヤと遅延情報を受け取り、運転整理手法を適用し、列車運行上における様々な制約を満たすように、列車運行シミュレーションを行い、運転整理ダイヤ案を作成する。

本節では、ダイヤ案作成部の概要について、運転整理手法の適用を行う部分と列車運行シミュレーションを行う部分に分けて説明する。

2.2.1 運転整理手法の適用

運転整理には、次項で示すように様々な手法があるが、それらの運転整理手法を適切にダイヤに変更を加えることにより遅れの波及を防ぐ。システムでは、運転整理手法を適用した段階では列車の順序関係や使用する線路を決定するのみで、その時点では各列車の着発時刻は決定しない。

2.2.2 主な運転整理手法

ここでは、実際の運転整理の場面において用いられる代表的な手法を説明する。

抑止

輸送障害が発生した際に一番最初に行われるのが、抑止である。障害が発生して、安全確認のために障害の原因となった以外の列車は停止する措置が取られるが、この際、駅間で停車した場合（これを「機外停止」という）、列車の中に乗客が閉じ込められる状況になり、乗客の不満が高まったり、急病人が出た時の対応ができなかったりする。また、踏切が長時間閉まったままになる原因になるなど、機外停止は出来る限り避けなければならない。そこで、不通区間が発生した場合に、その区間に向かっていて列車を最寄りの駅で停車させる抑止が行われる。図 2.2(a) は障害が発生した際に抑止を実行せずに機外停止が発生してしまった場合であり、(b) は抑止によって機外停止を回避した場合を示している。図においては、抑止は次の停車駅で行っているが、実際の場合は列車間隔等を加味して抑止する駅を決定することがある。

時隔調整

都市圏などで見られる高密度運転が行われている線区においては、ある列車に遅れが生じることにより運転間隔にばらつきが出ることがある。間隔のばらつきが生じると、最初の遅延列車に乗客が集中し、その結果乗降時間が増大し、それが原因で遅延が増大するという悪循環が生じてしまう。時隔調整は、前方の列車の発車時間を遅らせて間隔を均一に保ち、乗客を各電車に分散させ、早期にダイヤの回復を図る作業のことをいう。図 2.3 に時

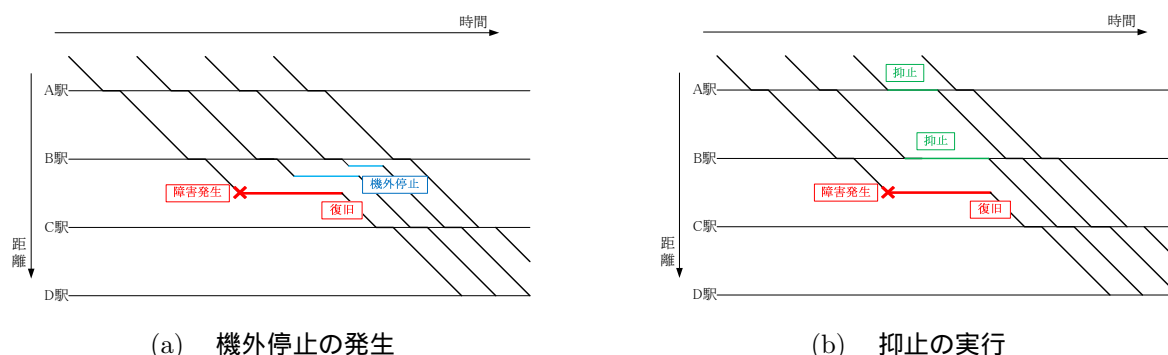


図 2.2: 抑止

隔調整を実施する前と実施後のダイヤを示す。遅延した列車の前方を走っている列車を C 駅で停車時間を増大させることにより、C 駅で乗車する人数を減少させ、発車までの時間を短縮することができている。

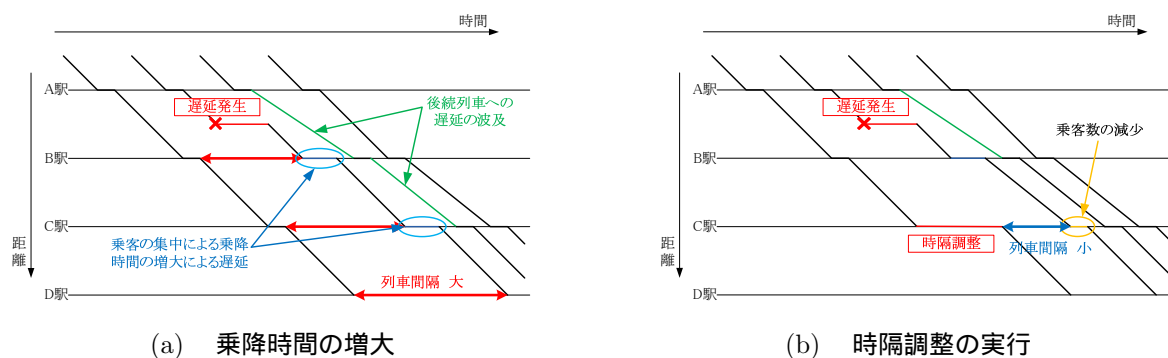


図 2.3: 時隔調整

待避変更

急行列車が緩行列車を追い抜く際、緩行列車を急行列車の出発や通過を待ってから発車させることがある。このような待ち合わせを「待避」といい、計画ダイヤの上において綿密に計画されているが、当初の計画通りの待避を行うと、複数の列車に遅れが波及してしまうことがある。

これを防ぐために待避を行う駅を変更する作業を待避変更という。図 2.4(a) は、点線で示したダイヤで運行する予定であったものが、急行列車に遅延が発生したことにより、A 駅にて普通列車が長時間急行列車の通過待ちのために停車している状態を示している。そこで、(b) のように急行の通過待ちを行う駅を B 駅に変更を行うことによって、普通列車の遅れを小さくする。この図で示した例の場合、A 駅にも B 駅にも待避を行う施設が必要である。つまり、待避変更を行う際には、待避を行う駅の設備や待避線の長さ等の制約を受けるため、注意が必要である。

運転線路変更

複々線区間においては、駅間で走行する線路が複数ある場合、一方の線路上で支障があると、他方の線路を利用して支障区間を避けて列車を運転することが可能になることがある。

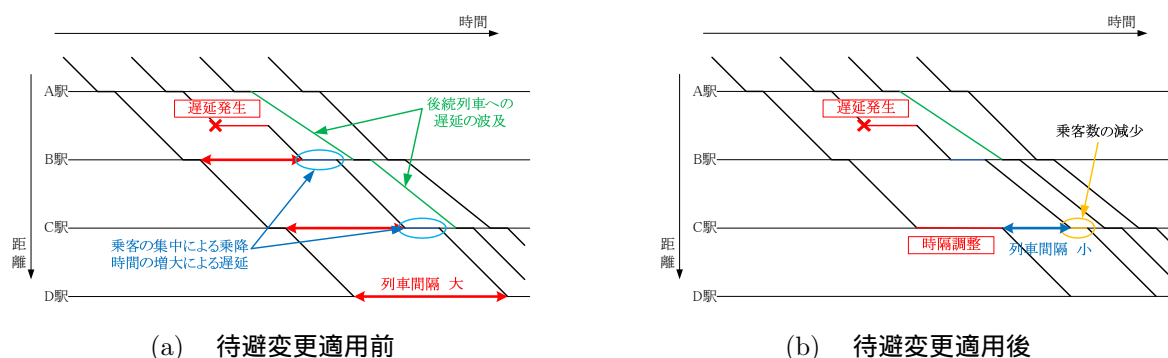


図 2.4: 待避変更

図 2.5 に運転線路変更の例を示す。黄色の列車が障害を起こした際に、後続の青の列車が点線で示した計画通りの経路を通ると、黄色の列車が邪魔になり先に進むことができない。そのため、運転線路変更を行い、実線で示した経路を通ることにより、不通区間を避けて先に進むことができる様子を示している。

しかし、緩行線を走行予定の列車を急行線に運転線路変更を行う際には、急行が停車しない駅にはホームが設けられていない場合もあるため注意が必要である。また、緩行線と急行線の渡り線の有無により出来る場所が限定されることになる。

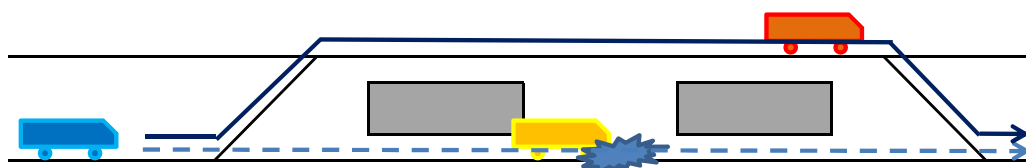


図 2.5: 運転線路変更

着発線変更

駅で列車が到着、発車、通過する線路を変更する手法を「着発線変更」という。前述の待避変更や、運転線路変更を行う際に併せて用いられることが多い。着発線変更を行う際には、ホームで乗車を待つ乗客の並びへの影響があるため、乗客への案内も重要となる。

運休、部分運休（打ち切り）

列車の運転を取りやめる手法であり、始発駅から列車を取りやめたり、途中駅で運転を中止したりする。列車を運休させることにより、遅延の早期回復が見込まれるが、輸送力の減少や運転間隔の不均一に繋がり、乗客の混乱を招く要因にもなる。

しかし、障害発生区間を運休にして、途中駅で折り返し運転を行うことで、障害が発生していない区間への影響を抑え、他線区、乗り入れ先の他社線区への影響を軽減することができる。

打ち切り列車の折り返す部分も併せて運転を取りやめ、区間運休と引換えに正常化を図る手法を「山切り」といい、打ち切り列車と同時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」という。

その他の運転整理手法

本来の通過駅に臨時で停車する臨時停車や、停車駅を臨時で通過する臨時通過、急行から各駅停車に変更するような種別変更、周期ダイヤの特性を用いて運休扱いにして後続の列車に運用を充当する段落とし、輸送力の確保と定時運行をするために別の車両を利用する特発等の手法がある。

2.2.3 列車運行シミュレーション

列車を運行する上では多くの制約条件が存在する。各制約条件に関しては次項で説明を行うが、運転整理手法を適用しただけでは、列車運行上の各制約を満たすとは限らない。そこで、運転整理手法を適用したダイヤでは、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ければならない。本研究では、列車の運行と制約条件をグラフ構造で表現することにより、制約を満たすダイヤを作成する。

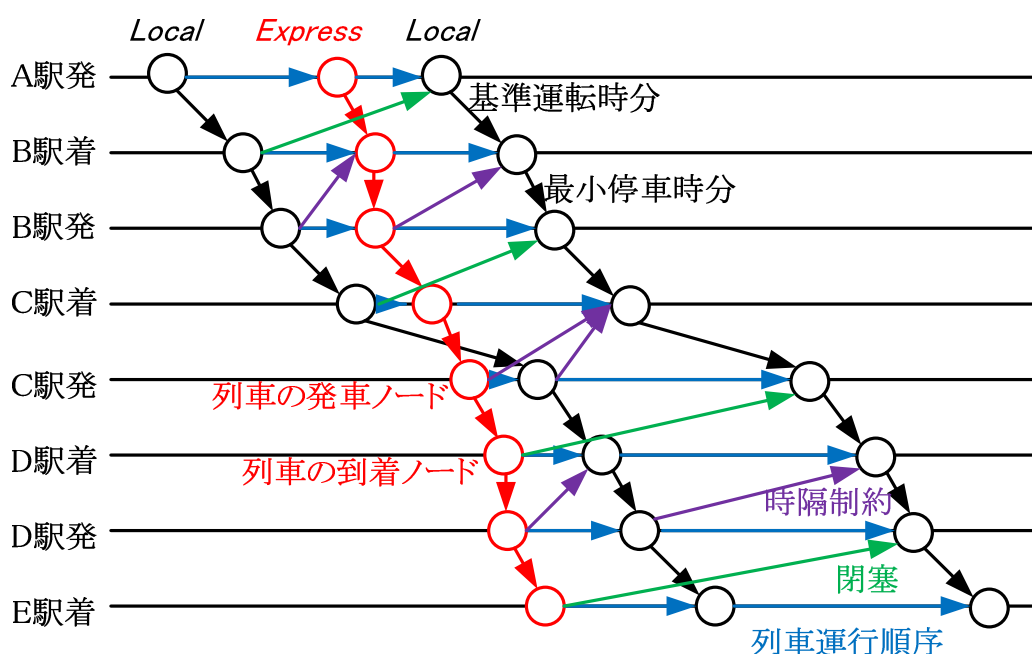


図 2.6: 列車運行シミュレーションに用いる列車グラフ

図 2.6 に列車運行シミュレーションに用いるグラフを示す。グラフ構造のノードは列車のそれぞれの駅での着発を示し、リンクは列車の運行、停車および列車運行上の制約を表している。リンクには制約の重みを付加し、このグラフ理論を用いて、最も制約が厳しい状況、すなわちリンクの重みの合計が最大となるような経路を探し出す。最大の経路を探し出す手法には、PERT (Program Evaluation and Review Technique) を用いる [8]。

2.2.4 列車運行上の主な制約

計画ダイヤ

列車の各駅の到着、発車、通過の時刻は、予め計画されたダイヤによって定められている。障害が発生した場合、一般的に列車の運行は計画ダイヤよりも遅れたものになるが、計画より早く運行することが可能であっても、基本的に計画ダイヤより早く運行することは通常は行われない。

計画ダイヤよりも早く列車運行が行われないという制約は、ある時刻を表す基準ノードを 1 つ設定し、基準となる時刻を表すノードから各列車の到着や出発を表すノードへ有効リンクを張ることで表され、そのリンクの重みに基準となるノードの時刻と計画ダイヤにおける出発・到着時刻との時間の差を重みとする。

基準運転時分

鉄道事業者は、各車種、使用番線に応じて、各駅間をどのくらいの時間で走行することができるか予め査定しており、その時間を基にダイヤを作成している。この運行に必要な最小時間を基準運転時分といい、その車両性能と速度制限の下で、限界まで早く運転したときにかかる時間であり、これ以上速く駅間を運転することはできない基準になる時間である。

基準運転時分の制約は、各駅における各列車の出発ノードから次の駅の到着ノードに有効リンクを張ることで表される。リンクの重みは、基準運転時分の時間を設定する。

最小停車時分

最小停車時分とは、駅において乗客の乗降のために停車するのに最低限必要な時間であり、列車が駅に停車する場合にはこの時間以上停車しなければならない。

最小停車時分の制約は、各駅における各列車の到着ノードから同じ駅の出発ノードに有効リンクを張ることで表される。リンクの重みは、最小停車時分の時間を設定する。(通過の場合、リンクの重みを 0 にする。)

閉塞

列車が衝突しないために、鉄道には閉塞と呼ばれるシステムがある。これは、線路を一定区間ごとに区切り、1 つの区間には 2 本以上の列車が入ってはならないというものである。これをシミュレーション上で表現するために、駅間に入れる列車の最大本数はその区間の閉塞区間の数であることから、駅間線路を同時に走行する列車数を制約することで擬似的に閉塞を作成している。例えば、駅間の閉塞数が n 個であるとき、到着ノードから n 本後の列車の出発ノードへ有効リンクを張ることにより表現される。なお、リンクの重みは 0 である。

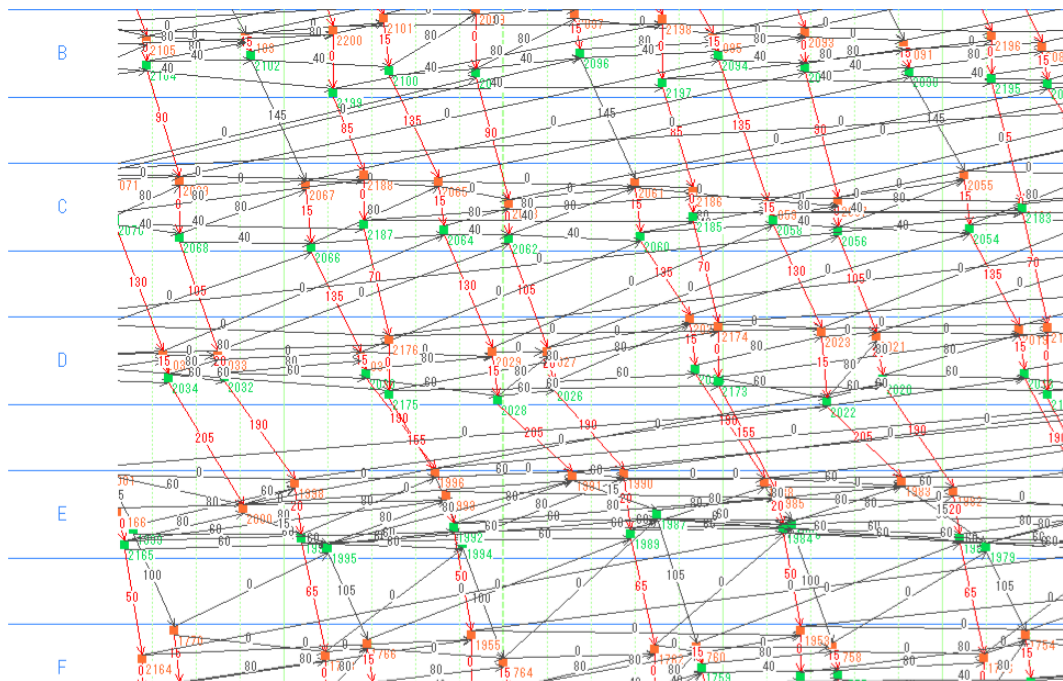
列車運行順序

列車が駅間を運行する順序はあらかじめダイヤ上で設定されており、この順序関係を制約とする。各列車の到着ノードから次の列車の到着ノード、各列車の出発ノードから次の列車の出発ノードへと有効リンクを張ることで表される。リンクの重みは、最低限開けなければならない間隔の時間で表される。

時隔制約

線路の競合を防ぐため、列車がある進路に進入する際、前の列車が進入した後一定時間が経過しないと次の列車は進入できない制約がある。この制約を満たすためのリンクを張り、その時間を重みとする。

列車は以上のような制約をすべて満たした上で、運行しなければならない。上記の制約を考慮して、実際の路線に適用した乗客流グラフの例を図 2.7 に示す。



2.3 運転整理ダイヤ案評価部の概要

運転整理の評価方法については、長らく議論されているものの確立された方法は未だに存在しない [9]。本研究では、現在、運転整理の評価を行う上で乗客の視点を考慮する必要があるという考えに基づき、運転整理案の評価は乗客の立場から見た評価量を用いている。

この評価法を行うために、作成されたダイヤ案に対してどのように乗客が行動するのかを推定する必要がある。そこで、本システムでは作成部で作成されたダイヤから乗客行動シミュレーションにおいて乗客流を推定し、そこから求められる乗客数から評価値の算出を行う。

2.3.1 乗客の立場から見た定量的評価

先述の通り、本研究では運転整理案の評価を、乗客の動きに着目し乗客の立場から行ったものを用いる。乗客が受ける不効用を評価値として、その値が小さいほど良い整理案であるものとする。

ここでは、乗客の受ける不効用として「所要時間」、「乗換」、「混雑」の3つの要素を考える。これらの3つの要素は互いに次元の違う物理量であるため、乗換と混雑の不効用はともに時間換算して取り扱う。

そのため、障害が発生していない通常の場合も評価値は0とはならない。以下に、各不効用の詳細を示す。

所要時間

乗客が発駅に到着してから、目的地に到着するまでに要する時間である。本システムにおける所要時間とは、乗客全員の所要時間の総計とし、以下の L_1 で表わされる。

$$L_1 = \sum_{i=1}^N t_i \quad (2.1)$$

N : 全体の乗客数 [人]

t_i : 乗客 i 単独の所要時間 [秒]

乗換

乗換は実際に移動する時間（不効用としては L_1 に含まれる）以上に乗客に不満を与える要素となる。また、同一ホーム上で乗換が行えるか、階段を渡らなければならないかなど乗換の条件により、その不満度は異なる。そのため、本システムでは、1 回の乗換における乗客の不満度を時間換算し、各駅の乗換元のホームから乗換先のホームごとにデータとして与える。その総和は乗換の不効用として考え、以下の L_2 で表される。

$$L_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_{ij}} r_{ij} \quad (2.2)$$

N : 全体の乗客数 [人]

M_i : 乗客 i の乗り換え回数 [回]

r_{ij} : 乗客 i の j 回目の乗換換算値

混雑

混雑した電車に乗り続けることも乗客の不満となる一因である。そこで、混雑度に応じて乗客の不満が非線形に変化する表 2.1、図 2.8 に示すような関数 f_c [10] を用いて、混雑による不効用を以下の L_3 で定義する。

$$L_3 = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=1}^{S_k} f_c \frac{q_{ks}}{c_{ks}} t_{ks} \quad (2.3)$$

n : 駅数

S_k : 駅 k に到着する列車の本数

f_c : 混雑度に対する人間の不快感覚を表す係数

c_{ks} : 駅 k に s 番目に到着する列車の乗車定員

q_{ks} : 駅 k に s 番目に到着する列車の到着時の乗客数

t_{ks} : 駅 k に s 番目に到着する列車の前の駅からの所要時間

表 2.1: 混雑に対する人間の不快感覚を表す係数

混雑度 R [%]	混雑度換算係数 f_c
0 ~ 100	$0.00027R$
100 ~ 150	$0.000828R - 0.00558$
150 ~ 200	$0.00179R - 0.2$
200 ~ 250	$0.0069R - 1.22$

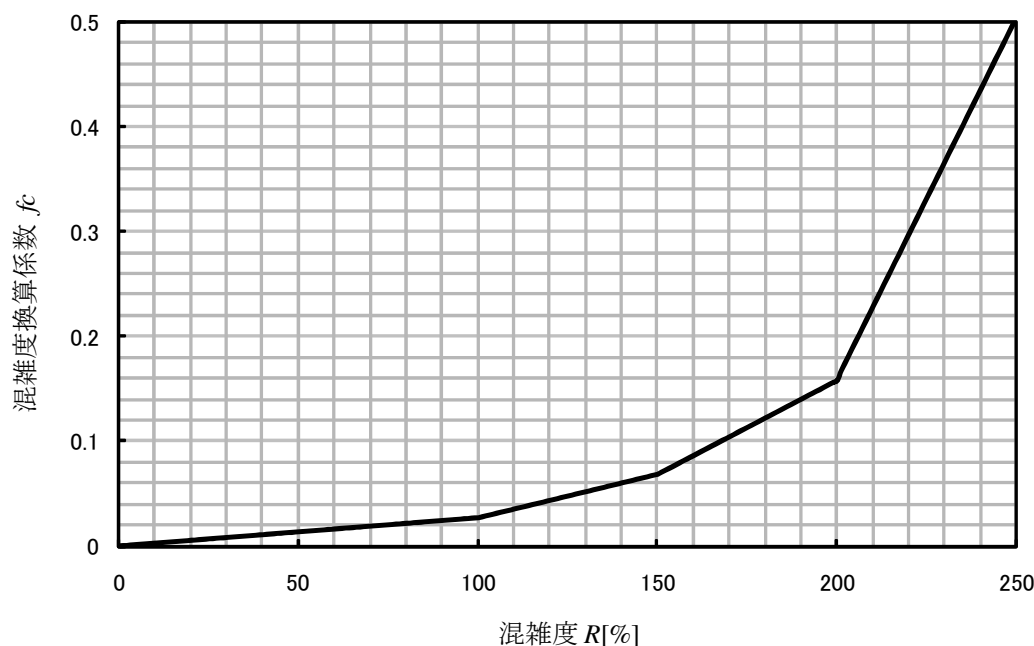


図 2.8: 混雑に対する人間の不快感を表す係数

これらの不効用の合計 L を乗客の受ける不効用として、 L が小さいほどよい運転整理案であると判断する。

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (2.4)$$

なお、物理量としての単位は [人・秒] である。

2.3.2 乗客行動シミュレーション

以上の評価値を求める上で、各列車の各区間における乗客数の推定を行う必要がある。そこで、乗客がどのように行動するかを推定する乗客行動シミュレーションを用いる。本システムでは、乗客は所要時間と混雑が比較的小さい経路を選択するという仮定の下で行動する。乗客の行動仮定の詳細は第3章にて詳しく説明する。

この乗客行動シミュレーションにおいても、列車運行シミュレーションと同様にグラフ理論を用いる。図2.9に示すように、ノードは各列車の各駅での着発を表し、リンクは列車の運行、停車及び乗換を表す。

このグラフは、乗客の行動可能な経路を示しており、リンクの重みでその経路の障壁を表している。ダイヤ作成部の列車運行シミュレーションから着発時刻を受け取り、各列車、各駅のそれぞれの出発ノードと到着ノードが作成される。出発ノードから次の停車駅の到着ノードへの運行を表す乗車リンクが張られ、到着ノードからは、乗車を継続する乗客の乗客流を表すリンクとして、その駅の出発ノードまでの停車リンクが張られる。この2つのリンクの重みとして、それぞれ乗車時間、停車時間を付加する。さらに、その駅において乗換可能な列車の到着ノードと出発ノードの間に乗換リンクを生成する。乗換は、同一種別の列車には終着駅以外には張らないものとし、基本的に異種別間の列車に張るものとする。

実際の路線で作成した乗客行動シミュレーションの乗客流グラフを図2.10に示す。このグラフを用いて、比較的不効用が小さくなる経路を探し出して乗客流を決定し、その乗客数から2.3の式を用いて評価値となる不効用の計算を行う。

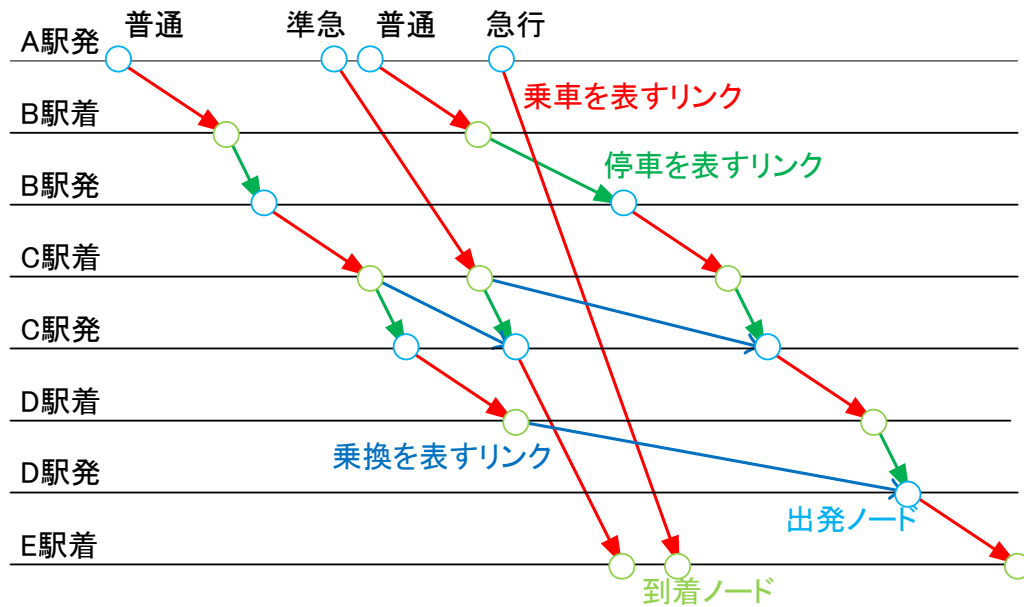


図 2.9: 乗客行動シミュレーションに用いるグラフ

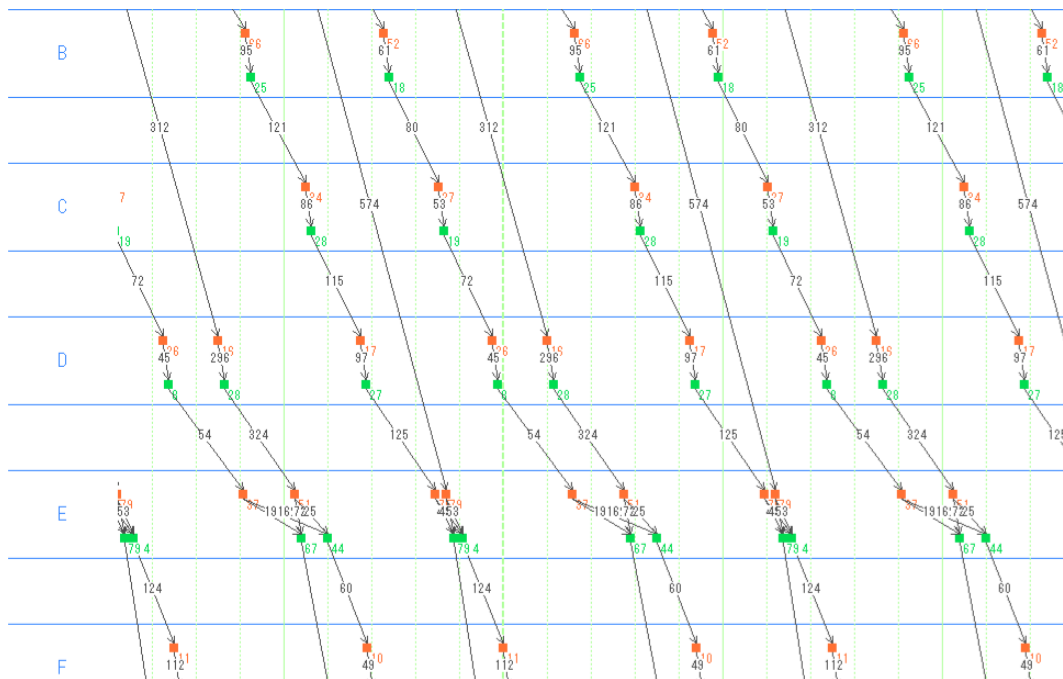


図 2.10: 乗客行動シミュレーションに用いる乗客流グラフ

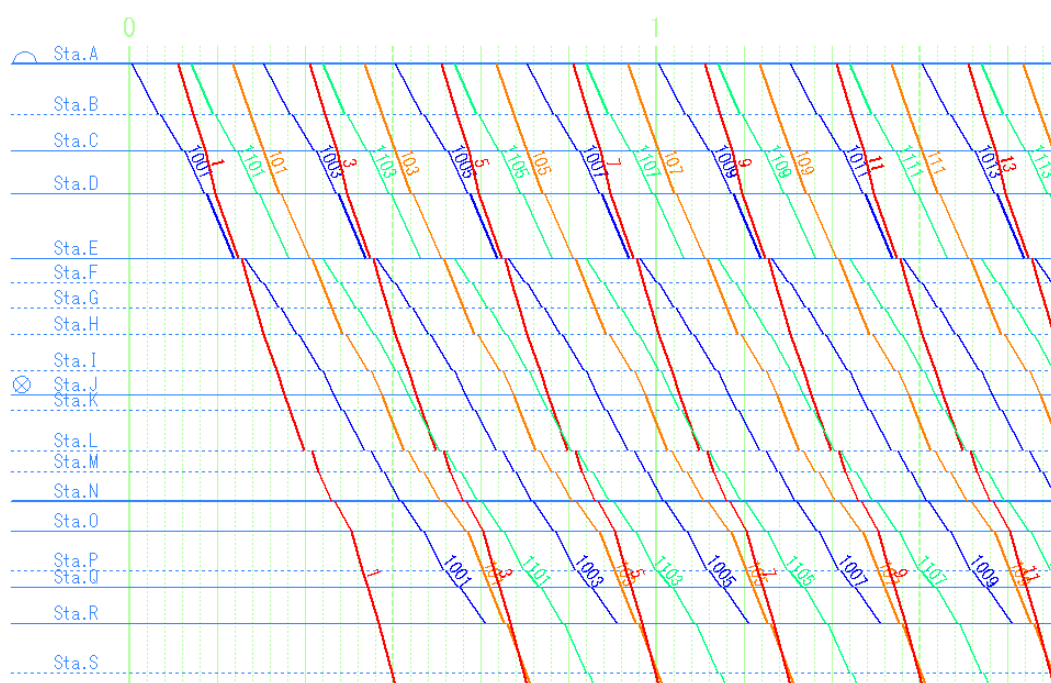


図 2.12: モデル路線の計画ダイヤ

第3章 複数経路を考慮した乗客流推定

先述の通り、本研究では乗客の不効用を基にした評価を行う。本章では、評価値を算出するのに必要な乗客の行動の仮定と推定について記述する。

3.1 従来の乗客流推定

2.3 節で述べた評価方法を用いて作成された列車ダイヤを評価するためには、各列車の各区間における乗客数の推定を行う必要がある。そこで必要となるのが、乗客がどのように行動するかの推定である。

乗客は一般的に、自らの不効用が小さくなるような行動を取ると考えられる。2.3 節で述べたように本研究では、最終的な評価をする際、乗客の不効用として、「所要時間」、「乗換」、「混雑」の3つの要素を用いているが、乗客流を推定する際、混雑は乗客の流れが決定した後でしか算出できないため、「所要時間」と「乗換」の2つの要素について考え、この2つの要素による不効用が最小となる経路を乗客は選択すると仮定している。

この仮定を行うためには、乗客は列車の運転時刻や列車同士の接続情報をすべて知らなければならず、現状の障害発生時には不可能ではあるが、移動通信網の発達に伴ない、将来的には乗客はそれらの情報を得ることが可能であるということを考えている。

乗客の出現モデルに関して、本来ポアソン分布に従い現れるものであるとすべきであるが、乗客の出現確率が十分に高く、十分な時間で推定を行う際は、ポアソン分布は連続一様分布に近づくことから、本研究では、時間に対して均一に出現するものと仮定する。

本システムでは、乗客の出現モデルには以下の2つのモデルを考えている。

モデル1

同一の出発地から同一の目的地へ向かう乗客は、出発駅に時間的に均等な間隔で出現する。出発駅に到着してから列車に乗るまでの待ち時間も所要時間に含まれる。

モデル2

同一の出発地から同一の目的地へ向かう乗客は、目的駅に到着したい時刻が均等になる間隔で推定される。目的駅に到着してから、元々到着しようとした時刻までの時間も所要時間に含まれる。

モデル1は、運行頻度の高い都市圏及び近郊区間の鉄道における乗客の大半を占める乗客の行動モデルと考えられ、時刻表を知らずに出発駅に到着する乗客を示している。一方、モデル2は、長距離鉄道や運行頻度の低い区間や時間帯の乗客行動モデルと考えられ、予め時刻表で乗車する列車を決定して出発駅にやってくる乗客を表している。

本研究では、都市近郊区間を対象としており、更に列車の運行が乱れている異常時には到着時刻に均一に到着するモデルは成り立ちにくいと考えられることから、モデル2を採用する。

従来の研究で採択されている手法では、2.3.2 で述べた乗客行動シミュレーションの乗客流グラフにおいて各時間に各駅からそれぞれの駅へ「所要時間」と「乗換」による不効用の和（それぞれの不効用は、2.1 式及び 2.2 式を用いる）が最小となる経路を計算する。すなわち、グラフ上においてリンクの重みの合計を最小にする経路を探索する問題となり、グラフの最短経路探索問題に帰着することができる。最短経路探索問題のアルゴリズムとして、グラフ理論において特定の 1 つのノードから他の全ノードとの間の最短経路を求めるアルゴリズムである Dijkstra 法を採用し、各列車の出発ノードからそれぞれの駅への最短経路を計算する。必ずしも次の列車に乗りした場合が最短経路になるとは限らないため、各時間に対して各経路の中から最短となる経路を求める処理を行い、その結果からそれぞれの時間に対してどの経路を利用するのが重みが最短になるかを算出する。

最後に、作成された経路に、OD データ（発駅と着駅の組み合わせごとの利用者数を表すデータ）を基に乗客人数を割り振って各列車の乗客数を推定する。

3.2 乗客流推定における複数経路の導入

前節で説明した方法では、乗客流推定を行う際に最短経路を用いた。本節では、最短経路以外の経路も考える方法を提案し、その効果について検証する。

乗客が最短経路のみを選択する仮定においては、乗換に対する時間損失分が短縮できる時間よりも 1 秒でも小さければ、その区間に該当するすべての乗客が乗換を行うということが発生する。

特に複々線区間では、急行線と緩行線を走行する列車がほぼ同時に出発、到着するケースが多くある。図 3.1 は急行線を走行する急行列車と緩行線を走行する普通列車が駅 B-駅 C 間でほぼ並走している例を示している。(a) で示す通常のダイヤの際は、普通列車が先に駅 C 到着するため、駅 B から駅 C に向かう乗客は普通列車を使用することになる。(2) に示すように普通列車に遅れが生じた際は急行列車が駅 C に先に到着することになるので、駅 B から駅 C へ向かう乗客は全員急行列車を選択することになる。数秒の遅れで乗客の行動が大きく変化することは考えられず、乗客は両方の電車に分散して乗車すると考えられる。

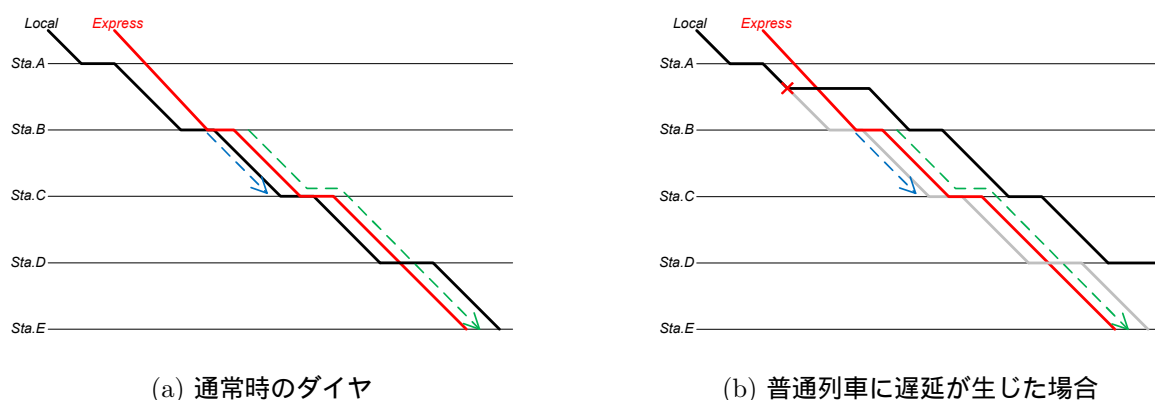


図 3.1: 通常ダイヤ時の乗客数の推移

この現象は、乗車限界人数を超えた乗客の扱いを考える積み残しの問題や乗降客の増加による停車時間の増加を考える増延の問題を考える上で、不効用が最小となる経路を選択するというモデルは不適切な結果が得られることが確認されている [6]。

また、乗客が最短経路のみを選択する状況下においては、全員の行動が同様のものとなるため、運行頻度の高い都市圏の列車が列車の乱れにより列車間隔が詰まるような状況の場合、少しの運行の違いで大きな乗客流の差が

現れてしまうことがある。図 3.2 はその一例を示しており、リンク上の数字は各区間の乗客人数を表しているが、丸で囲った列車には該当の区間誰も乗車していないという現象が発生している、これは後続列車に乗った方が不効用が小さくなるからであるが、時間がかかってでも空いている列車に乗りたい人もいることを考えると、不自然な乗客の流れになっていると言える。

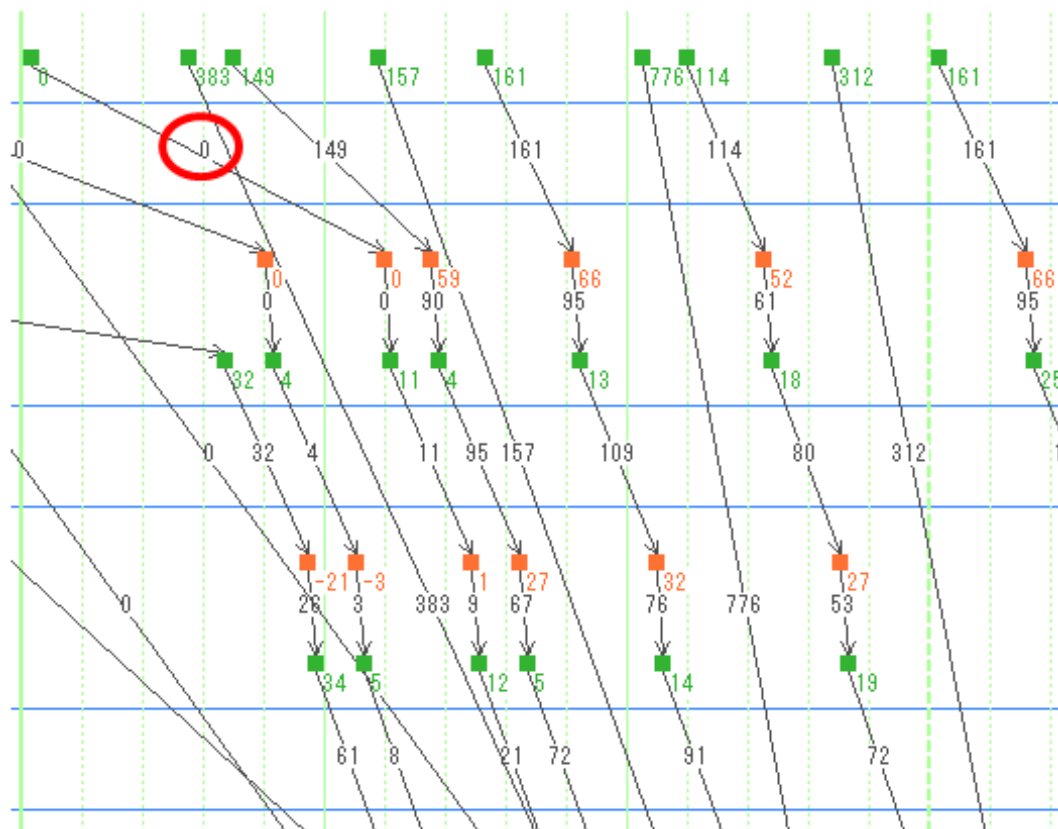


図 3.2: 乗客数 0 が存在する乗客流グラフ

そこで、これまで乗客の行動仮定を所要時間と乗換の不効用が最小となる経路を選択するとしていたものが、乗客が所要時間と乗換の不効用が比較的小さい経路を確率的に選択するものであるという行動仮定に変える。

通常時においても普段から頻繁に乗る路線に関しては予めどの地点でどのくらい混雑するかがわかっておりその混雑を回避する行動を取る人がいることも考えられるため、この手法は現実的であると言える。

その複数経路の求め方について以下に挙げる 2 つの方法を考える。

3.2.1 k -th Shortest Paths アルゴリズムの導入

1 つ目の方法として、グラフ理論において厳密に 2 番目、3 番目の経路を求める k -th shortest paths アルゴリズムを導入する。本論文では、アルゴリズムとして乗換案内等でも使われている MPS 法というアルゴリズム [11][12] を用いる。MPS 法に関しては付録として本論文の付録に詳細を掲載する。

なお、 k -th shortest paths アルゴリズムを用いる際、従来の乗客流グラフを用いると、各出発ノードから各到着ノードまでの最短経路を求めても、出発地で乗車する列車と目的地に到着するときに乗っている列車が同一の組み合わせの中で複数の経路を探索することになり、どこで列車を乗り換えるかという乗換駅による違いを求めることしかできなく、各出発ノード-到着ノード間でそれぞれ 3 番目までの経路を求めるには非常に無駄が発生する。

そこで、図 3.3 に示すように駅ごとに到着をまとめるようなノード（駅ノード）を作成し、各駅の全列車到着ノードから、駅ノードに重み 0 のリンクを張り、各出発ノードから各駅ノードへの k 番目の経路を求めることを考える。

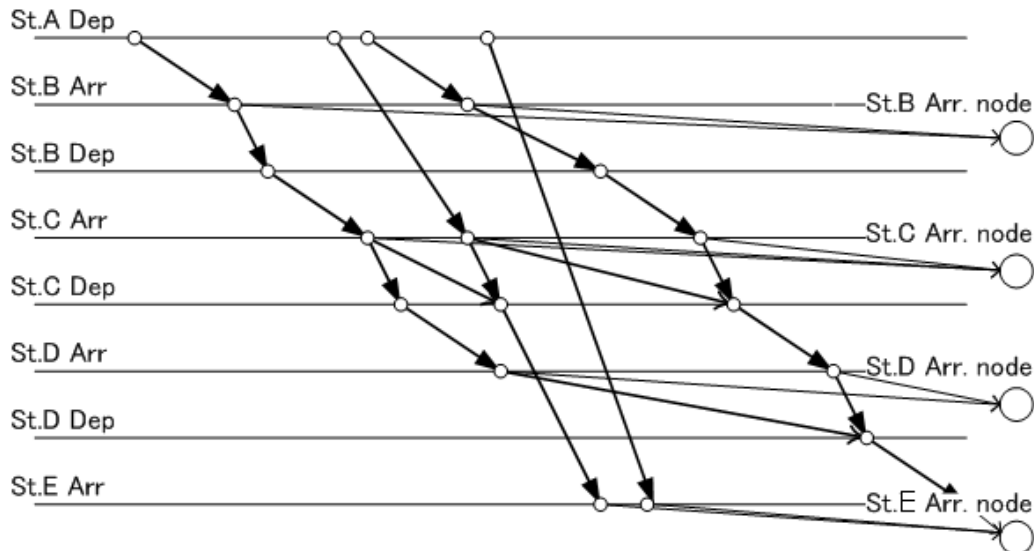


図 3.3: 駅ノードの導入

さらに、 k -th shortest paths アルゴリズムを用いた場合、乗換駅の違いの経路が駅ノードを導入しても評価値に変化はないため、同じまたは近い評価値で乗換駅による違いの経路が複数出てくる傾向にある。そのため、待ち時間が多い経路には人の流れが少なくなるように、これまで所要時間としてまとめていた時間を、乗車時間と待ち時間に分け、待ち時間には乗車時間の 1.2 倍の不効用があるものとして、乗客流の推定を行った。なお、待ち時間の不効用を増大させるのは乗客流推定の際のみとし、評価の際は、従来の評価値を使うものとする。

ただし、この手法はグラフの規模が大きくなり、求める候補数が増加すると計算時間がかかるという欠点がある。図??は乱数を用いて作成したノード数 1000、リンク数 48725 の有向グラフにおいて MPS 法を用いて計算を行った時の計算時間のグラフである。候補数が増加するに連れてほぼ比例的に計算時間が増大しているのが確認できる。

3.2.2 拡張 Dijkstra 法の導入

計算時間の増大を抑えるために厳密解を考えずに近似的な方法を考える。

Dijkstra 法で求めた各出発ノードから各到着ノードへの最短経路のうち、駅から駅を考えた際に他の経路を使った方が最短経路となるため棄却されていた経路を保持して、2 番目、3 番目 … の経路にすることを考える。

従来の手法では、各列車の出発ノードから各列車への到着ノードへの最短経路を考えており、実際に利用するデータは出発ノードが等しく到着駅が等しい経路毎に比較し、各列車の出発ノードから各駅への最短経路を考えた後、乗客が出発駅に到着するそれぞれの時刻に対しどの経路が目的地に最短で到着できるかを考えている。

その過程において、棄却される経路のうち乗客の損失が少ない順に、2 番目、3 番目、… として複数経路とする方法をとる。

この方法では、厳密な意味での 2 番目、3 番目の経路を得ることはできないが、単一経路の時と比較して Dijkstra 法の結果を比較する処理が加わるだけなので計算時間が短縮できる。

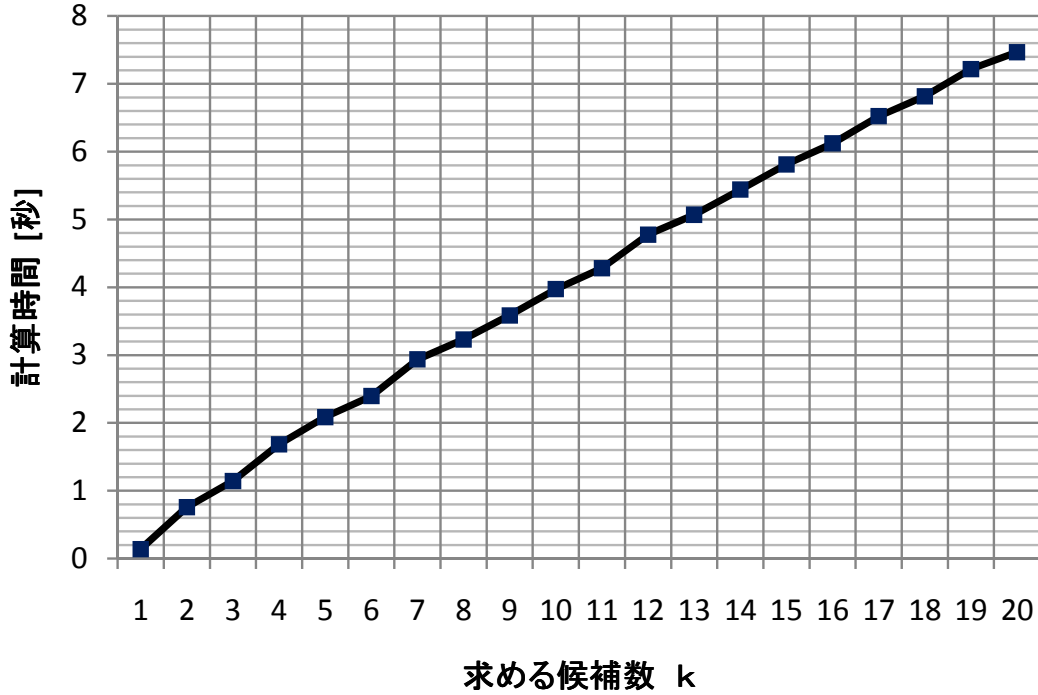


図 3.4: 駅ノードの導入

3.2.3 乗客の選択確率

これまで、複数経路を求める手法について説明を行ったが、それらの経路を乗客が選択する確率について述べる。

一般に交通機関の選択行動を予測する手法として、非集計行動モデルが用いられる。これは、個人が行動を決定する際、確定項と誤差項によって表される効用が最大となる選択肢を選択するという仮定に基づいている。本研究では、非集計行動モデルで最も用いられているロジットモデル（誤差項がガンベル関数で表されるモデル）を基にしたものを利用する。

乗客が経路 i を選択する確率 P_i は、非集計行動モデルとして次の式に従うものとする。

$$P_i = \frac{\exp(-\theta C_i)}{\sum_{j=1}^n \exp(-\theta C_j)} \quad (3.1)$$

ここで、 C_i は i の経路をとった場合の所要時間と乗換の時間換算の和であり、 n は選択可能性のある経路数である。本研究では $n = 3$ を採用し、上位 3 経路の中で乗客が選択するものであると仮定している。 θ はロジットモデルのパラメータであり、最尤法にて求められる数であるが、本研究では妥当性のある数値を仮定してパラメータを決定している。

3.3 モデル路線における複数経路導入の効果の検証

混雑率に関する評価値として、平準度と呼ばれる値を導入する [13]。平準度は、駅 i と駅 j の間の列車 j ($j = 1, 2, \dots, N$) の混雑率を C_{ij} としたとき、下の a_i によって定義する。

$$a_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_i} (C_{ij} - m_i)^2 / N_i} \quad (3.2)$$

ただし、 m_i は駅 i と駅 $i + 1$ の間の平均駅間混雑率であり、以下の式で表されるものとする。

$$m_i = \sum_{j=1}^{N_i} c_{ij} / N_i \quad (3.3)$$

この平準度は、値が小さいほどその駅間での混雑が平準化されているということを示す値となる。一般的に、急行列車と緩行列車を比較した際、急行列車に人が集中しやすい傾向があり、障害が発生していない場合においても、平準度は高い値を示す場合がある。

そのため、本研究では通常時と障害発生時との平準度の比較を含めて検討する。

3.3.1 通常ダイヤを用いた場合

モデル路線の 3 時間ダイヤに Dijkstra 法、MPS アルゴリズム、拡張 Dijkstra 法を適用し、通常ダイヤの場合についての乗客数及び評価値の比較を行った。

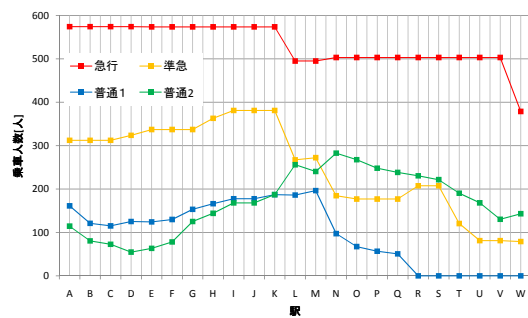
通常時の列車種別毎の乗客数の推移を示したグラフを図 3.5 に、駅間の平準度を表したグラフを図 3.6 に示す。図 3.5 は、各駅を出発する地点で各列車に乗車している人数を示しており、(a) に最短経路のみを選択すると仮定した乗客流推定を用いた結果、(b) に複数経路を k -th shortest paths アルゴリズムを用いて決定した結果、(c) に複数経路を拡張 Dijkstra 法を用いて決定した結果を示している。通常ダイヤの場合は、均一の乗客が現れる周期ダイヤを仮定しているため、乗客数も同じ周期が現れることになり、同一種別の列車の同一区間の乗客数は一致することになる。

乗客流推定の結果として、いずれの乗客流推定を用いた場合も全区間において急行に人が集中しており、降車する乗客が多い駅 L において、急行と準急の乗車人数が減少していることがわかる。また、普通 1 の終着駅である駅 R 以降は、比較的運行密度の低い時間を運行する普通 2 が乗客数が増加している。

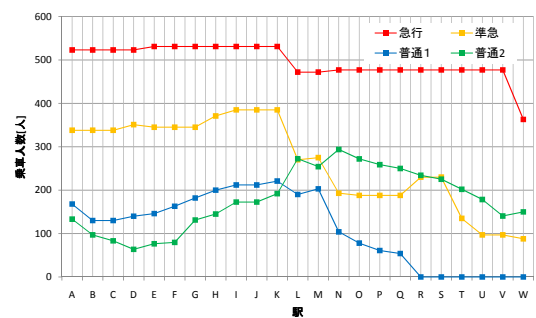
単一経路選択の乗客流推定と複数経路選択の乗客流推定の結果を比較すると、急行の乗車人数が全区間に渡り減少しているのに対し、普通列車の乗客が僅かに増加している。平準度の比較においても、単一経路選択の乗客流推定よりも複数経路選択の乗客流推定の方が平準度は小さくなっており、複数経路を用いる場合の方がより分散した乗車を行うような乗客流推定になっていることを示している。

しかし、拡張 Dijkstra 法を用いた場合は、 k -th shortest paths アルゴリズムを用いた場合に比べて平準度は高めになっており、厳格に 2 番目、3 番目に損失が小さい経路を見つけることのできない拡張 Dijkstra 法では有効であると考えられる経路を探しきれていないことを表していると言える。

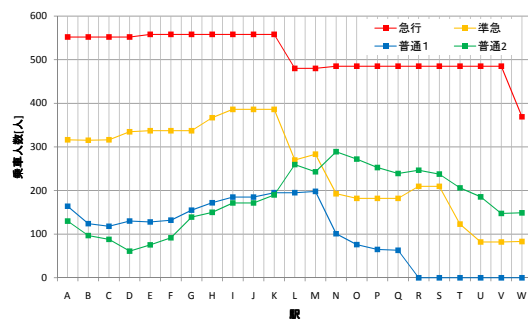
これらの 3 つの乗客流推定を用いた場合のそれぞれの評価値を図 3.7 に示す。最短経路以外の経路を選択する乗客を行動過程に加えたことにより、所要時間と乗換による損失が増加したため全体としての総損失も複数経路を選択した時の方が増加しているが、混雑による不効用は複数経路を用いた乗客流推定の方が小さくなっている。



(a) 単一経路の乗客流推定



(b) MPS アルゴリズムを用いた乗客流推定



(c) 拡張ダイクストラ法を用いた乗客流推定

図 3.5: 通常ダイヤ時の乗客数の推移

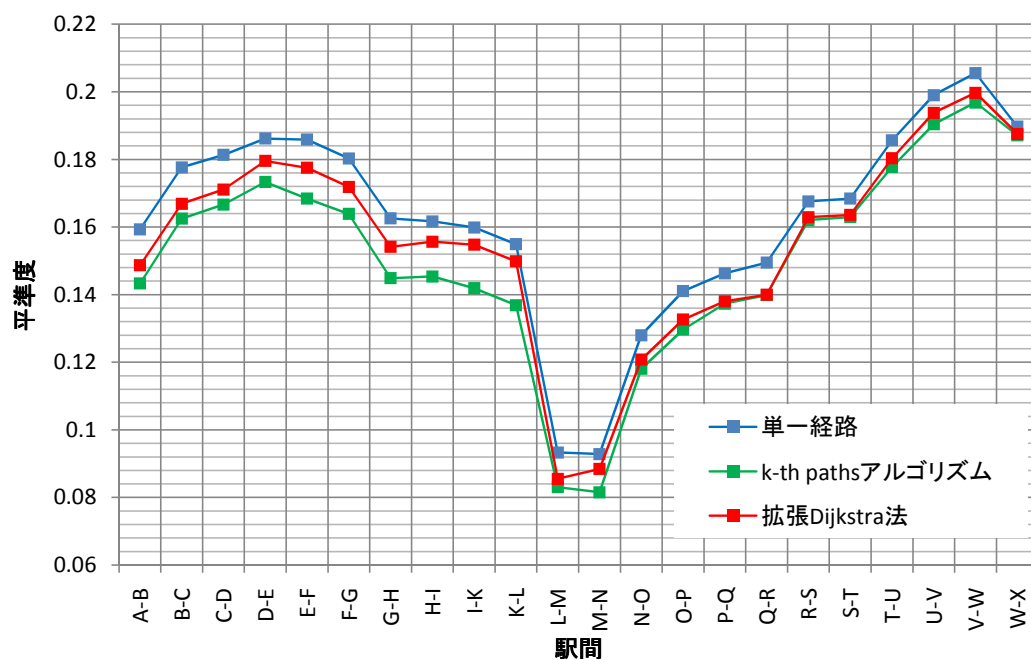


図 3.6: 通常ダイヤ時の標準度の推移

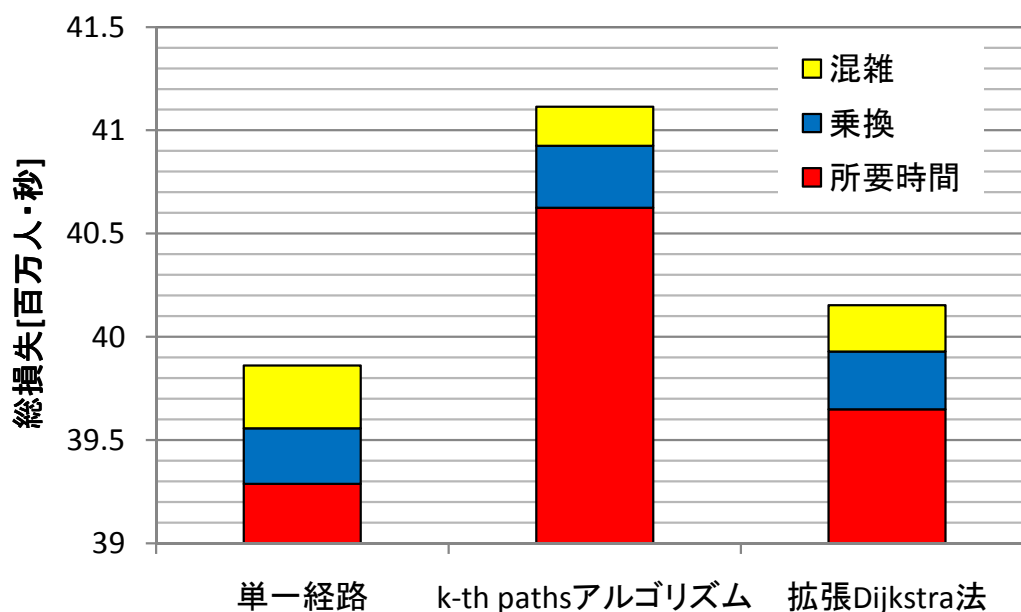


図 3.7: 通常ダイヤ時の乗客流推定による評価値の比較

3.3.2 運転整理案を用いた場合

運転整理をしたダイヤとして、図 3.8 に示すダイヤを用いる。このダイヤは、列車番号が 1005 の普通列車 (以後、この列車を「事故列車」と記述する) が駅 D と駅 E の間で 30 分遅延した時の運転整理案の 1 つを示している。

運転整理案の列車種別毎の乗客数の推移を示したグラフを図 3.9～図 3.11 に、駅間の平準度を表したグラフを図 3.12 に示す。

乗客数の推移は、従来の Dijkstra 法のみを用いて乗客流推定を行った場合を図 3.9 に、 k -th Shortest Paths アルゴリズムとして MPS 法を用いた乗客流推定を行った場合を図 3.10 に、拡張 Dijkstra 法を用いた乗客流推定を行った場合を図 3.11 に示している。それぞれの図は、列車種別ごとのグラフで表しており、障害による影響が大きい事故列車前後の乗客数を示したものである。種別ごとに障害発生時刻において事故列車の前方にいる列車を事故列車から近い順に「事故列車-1」、「事故列車-2」、…としている。

運転整理案を用いた場合も、通常ダイヤ同様に全体として急行列車の乗客が減少し、普通列車の乗客が増加する傾向にある。

また、単一経路の乗客流推定では、「普通 1 の事故列車+2」や「準急の事故列車+2」のように運行間隔が密になっている列車には乗客がほとんど乗車していないに対し、複数経路を利用する乗客流推定においては乗客が分散して乗車していることがわかる。さらに、「普通 2 の事故列車+2」と「急行の事故列車+4」の駅 L と駅 N の間を考えたとき、出発は普通列車の方が早く、到着は急行列車の方が早いという複々線が多く見られる状態にあるが、単一経路の乗客流推定では、駅 L から駅 N へ向かう乗客は全員急行列車を待って乗車していたのに対し、複数経路を考えたときは両方の列車に分散して乗車すると考えられる。そのため、複数経路を用いた乗客流推定による乗客数が単一経路の乗客流推定に比べて該当区間で普通列車が増加し、急行列車が減少している。

平準度の比較においても、通常ダイヤ同様、複数経路選択の乗客流推定の方が低くなっており、分散して乗車していることがわかる。しかし、拡張 Dijkstra 法を用いた場合の平準度が前半の区間で k -th shortest paths アルゴリズムを用いた場合に比べて高くなっており、有効なパスが未考慮であると考えられる。

運転整理案で乗客流推定を行ったときの総損失の比較を図 3.13 に示すが、この場合も通常ダイヤのときと同じ

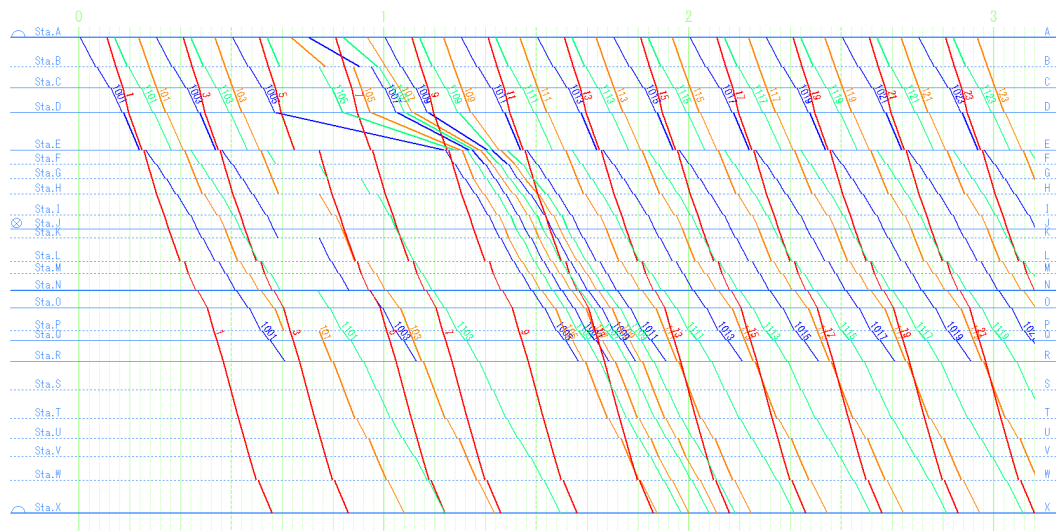
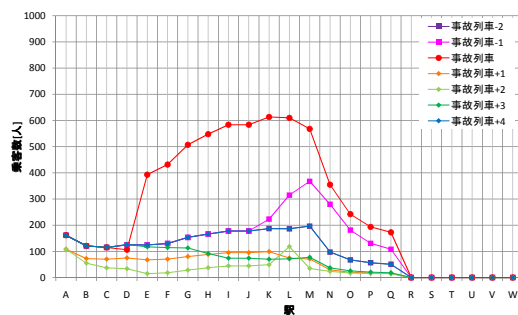
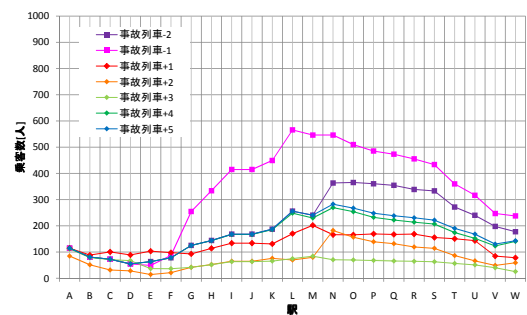


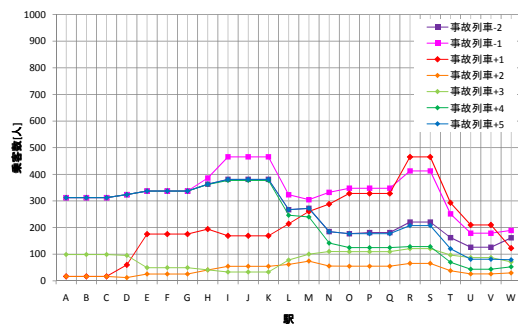
図 3.8: 検証に用いる運転整理案



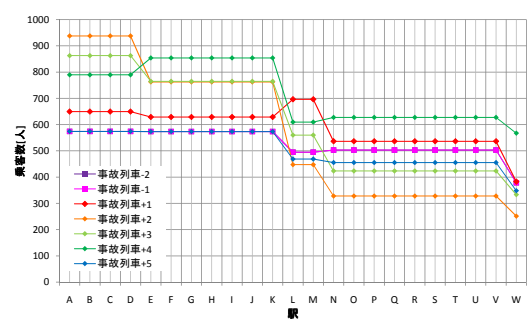
(a) 普通 1



(b) 普通 2

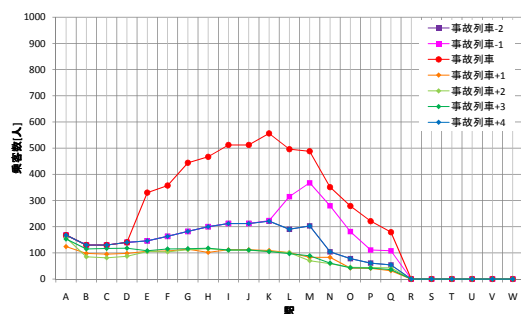


(c) 準急

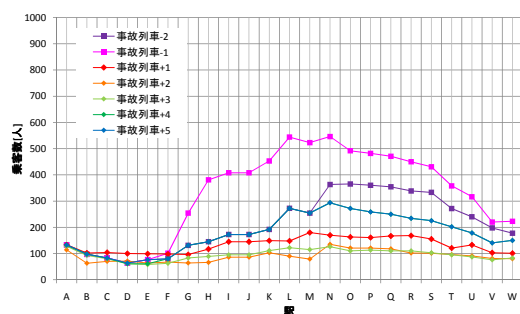


(d) 急行

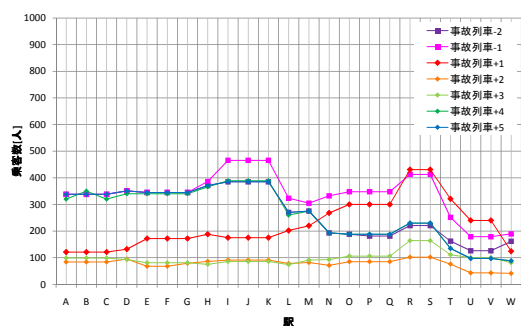
図 3.9: 運転整理案の乗客数の推移 (単一経路)



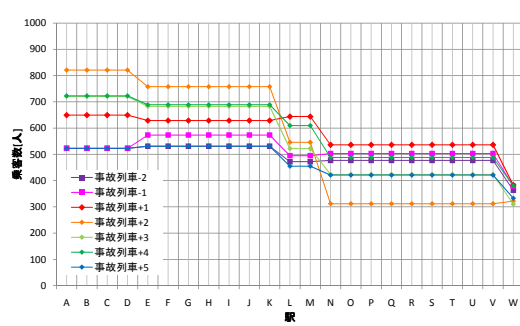
(a) 普通 1



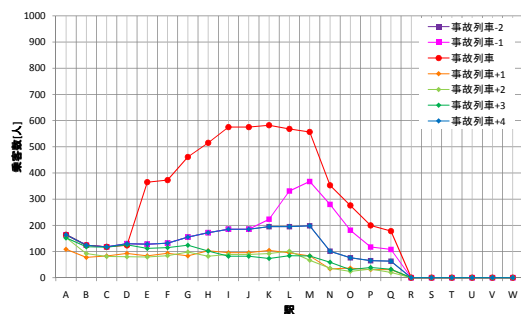
(b) 普通 2



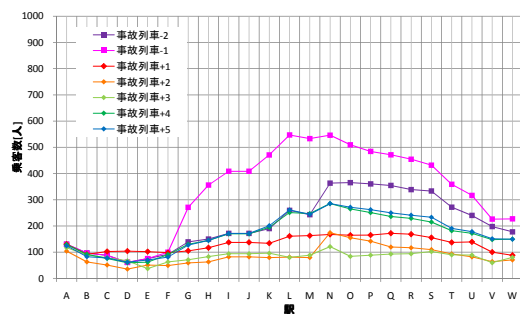
(c) 準急



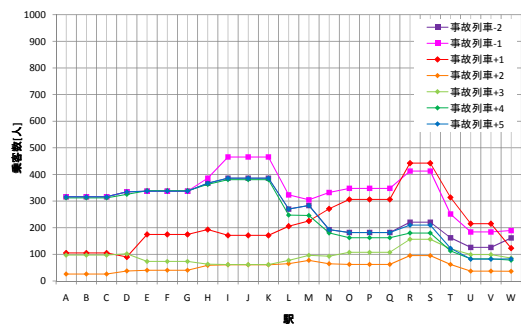
(d) 急行

図 3.10: 運転整理案の乗客数の推移 (k -th shortest paths アルゴリズム)

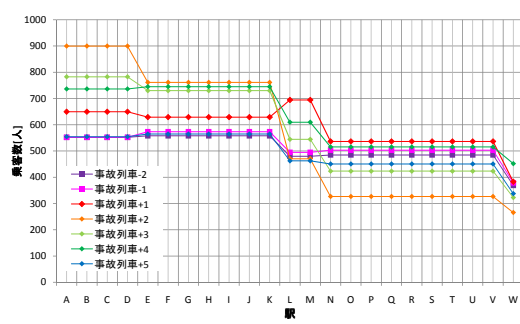
(a) 普通 1



(b) 普通 2



(c) 準急



(d) 急行

図 3.11: 運転整理案の乗客数の推移 (拡張 Dijkstra 法)

傾向にあるといえる。

3.3.3 混雑度の高い区間での影響

混雑に対する影響を調べるため、運転整理案の乗車定員を 3 分の 1 にし、模擬的に乗車率の高い区間を作成してシミュレーションを行った。その時の評価値の結果を、乗車定員が通常の場合と比較して図 3.14 に示す。

その結果、単一経路を用いたときは混雑による不効用が大きく上昇していることがわかる。これは、乗客が 1 つの列車に集中していることで発生しているものであると考えられ、複数経路のモデルは所要時間と混雑を陽に考慮して分配しているが、陰に混雑による不効用も単一経路の場合と比較して考えられていると考えられる。

3.4 まとめ

本章では乗客流推定時の乗客の行動モデルについて提案を行った。従来は、乗客は所要時間と乗換による不効用が最小となる経路を一意的に選択するモデルを用いていたが、本研究では不効用が小さい複数の経路から確率的に選択するモデルを適用した。

複数の経路を選択する方法として、厳密に不効用が 2 番目、3 番目に小さくなるような経路選択をする k -th shortest paths アルゴリズムを用いる方法と、厳密性は下がるが計算時間が短くなる拡張 Dijkstra 法と 2 種類の場合について検証を行った。

その結果、通常ダイヤ、運転整理を行ったダイヤにおいて共に乗客の流れの変化をシミュレーションし、複数経路を選択する乗客の行動モデルの方が、乗客が分散して乗車することが確認できた。また、拡張 Dijkstra 法を用いた経路の選択では十分な効果が得られない区間があり、厳密に不効用が k 番目に小さい経路を探索した方が有効であると考えられる。さらに、乗客流グラフと本研究で用いている路線の規模を考えた際、計算時間の増大は k が小さい範囲では大きく影響しない。

次章以降は、 k -th shortest paths アルゴリズムである MPS アルゴリズムを用いた乗客流推定を利用し、不効用の小さい 3 つ経路を乗客行動モデルに導入した乗客流推定の方法を利用する。

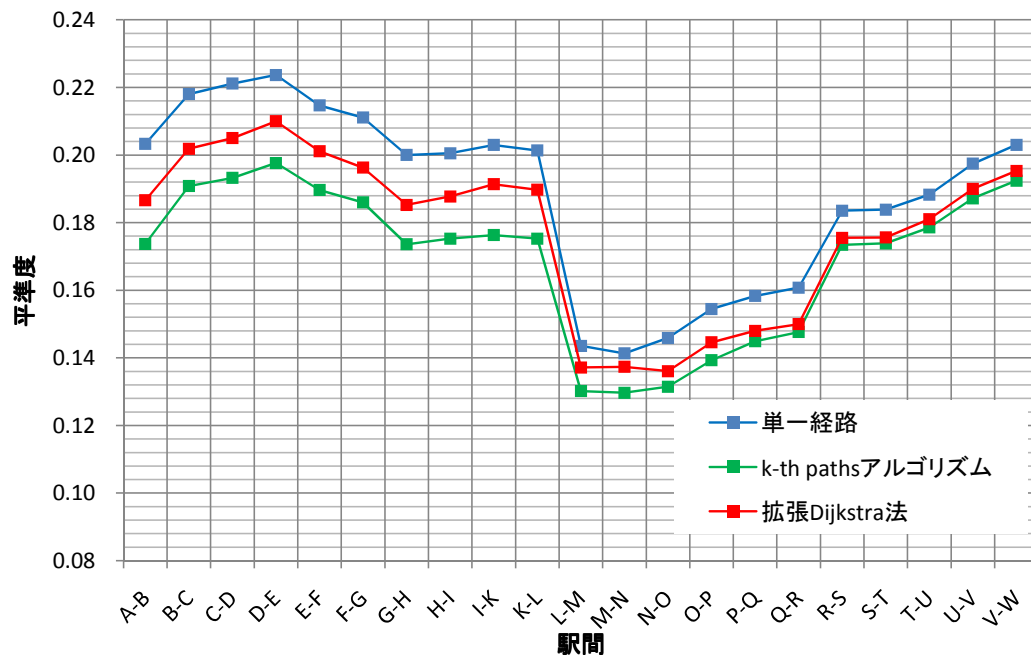


図 3.12: 運転整理案の平準度の推移 (単一経路)

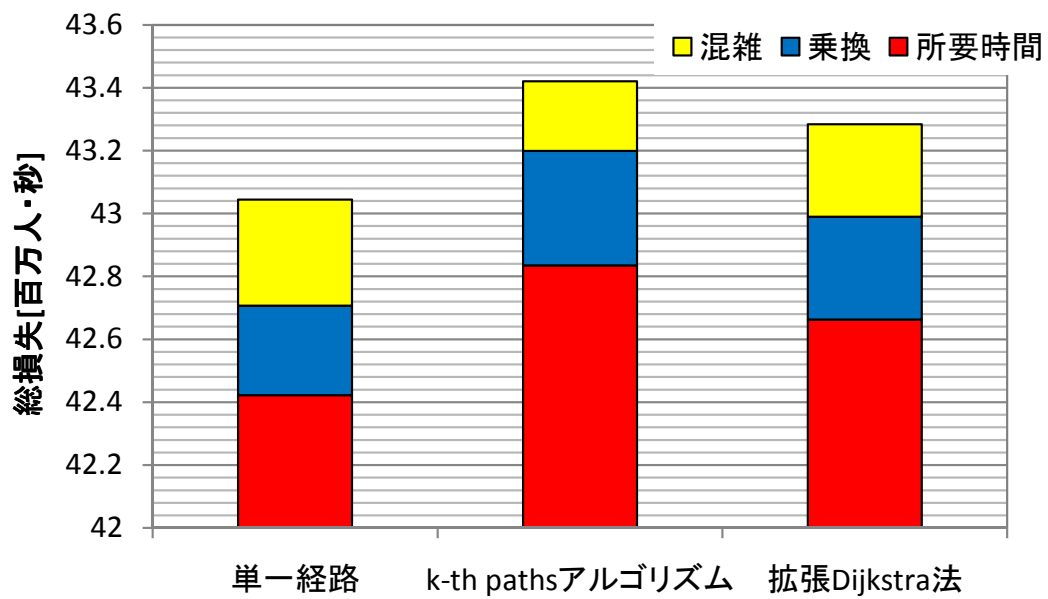


図 3.13: 運転整理案の乗客流推定による評価値の比較

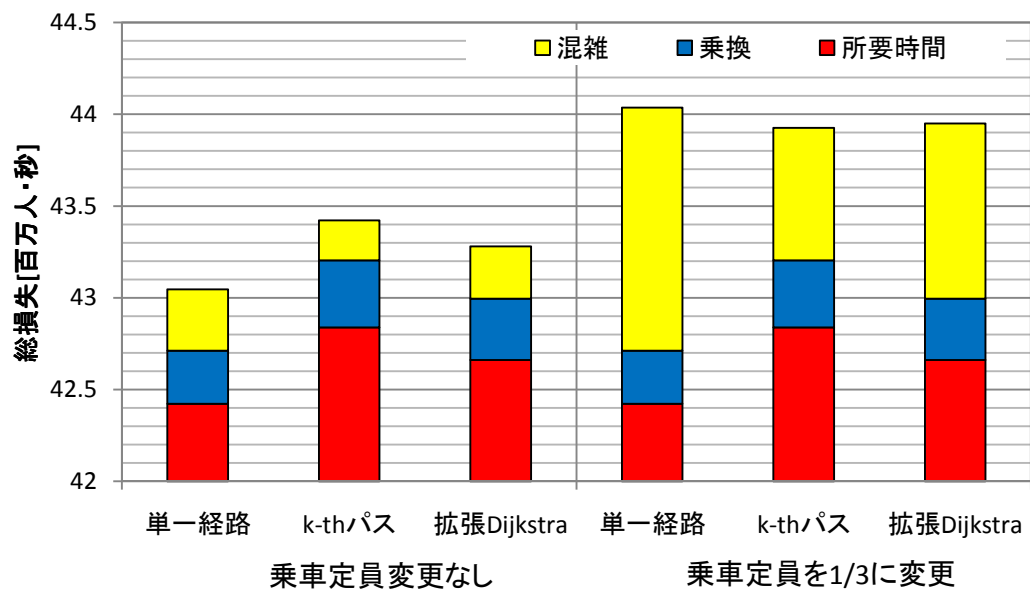


図 3.14: 乗車率が高い区間での影響

第4章 暫定運行計画の運行計画パターン

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を行う上で、障害が発生してから運転整理を実行するまでの間の運行計画に関する提案について記述する。

4.1 整理案作成時間及び時系列を考慮した運転整理

運転整理が行われる際、時系列に沿って様々な事象が起こる。図 4.1 に、運転整理の時系列に沿って起こる主な事象を挙げるが、本来はすべての事象において一定の時間を要するため、各々の事象に対し時系列を考慮する必要がある。具体的に主な次章に関して以下に説明する。

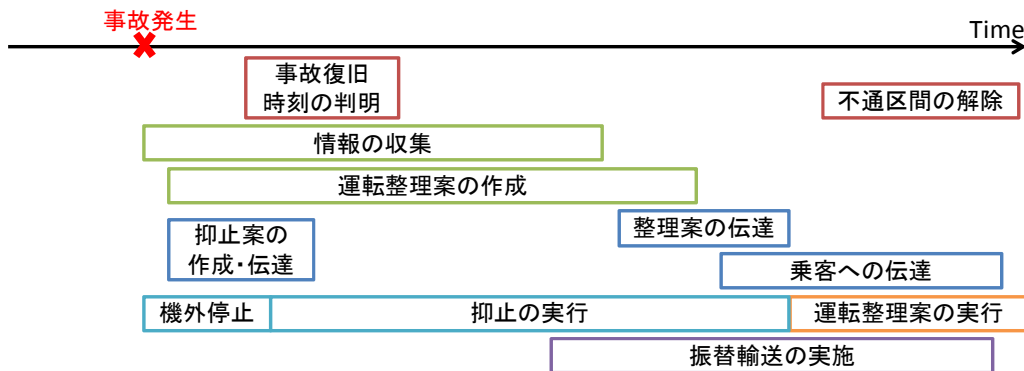


図 4.1: 運転整理を行う際の主な時系列事象

障害状況の把握・復旧時刻の予測

障害が発生した際、その復旧にかかる時間を予測して運転整理案を作成しなければならない。現場から指令へ的確な情報が伝えられ、その状況に応じて復旧時刻を予測する。

関係列車の抑止

障害が発生した際、安全を確保するために列車は一時的にその場で停止するが、障害の規模がある程度の大きさである場合、長時間駅間に乗客を乗せたままの列車が存在してしまうことを回避しなければならない。そのため、後続の列車を直近の駅まで運行して駅で停止する措置を取る。

優先的に運行を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駅を決定する。

運転整理案の方針の決定

障害の規模が大きくなると、運転整理の基本方針を立てることが重要となる。具体的には、列車の遅延の波及をいつ頃迄に収束させるか、そのためにどの列車を運休するかということを考える。本研究の具体的な検討は、運行密度の 높くない昼間の時間帯を対象としており、夕方のラッシュ時間帯までに解消することを考えている。

運転整理案の作成

障害状況と復旧時刻の予測や運転整理の基本方針を踏まえ、実際に運転整理案を作成する。本研究では、利用する運転整理手法を決定し、その評価を行うことになる。

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。駅員、乗務員、車両基地、乗務員基地、関係線区の指令員などが関係者に含まれる。運転整理案の伝達は、多くの在来線で今でもファックスや 1 列車ごとの無線通信で行われている。

乗客への伝達

運転整理の実施にあたり、重要となってくるのが乗客への情報伝達である。運転整理案作成中は駅員も不確定的な情報しか持っておらず、混乱を防ぐために乗客への伝達出来る情報が限られる。しかしながら、正確な情報をいち早く乗客に伝えることは課題として挙げられる。

振替輸送の実施

大都市近郊の鉄道網においては、列車の運行密度が高く乗客数も多いため、ターミナル駅では乗客が滞留して混乱が発生する。乗客への利便性と安全の確保の観点から、他社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。この振替輸送の実施のために鉄道事業者間の連絡・手配が必要となる。

これらの事象を考えなければならないが、先行研究では個別に事象を考慮する代わりに示すようにダイヤを時系列に沿って分割する近似を行った。

4.2 暫定運行計画の導入

4.2.1 因果律を考慮した乗客流推定

まず、乗客流推定を行う上で、乗客が予め障害発生を予見するような行動を取ることは不自然であると考え。そこで、正常時と障害発生後の 2 つにダイヤを分割するという手法が取られた。乗客が障害発生によって到着が遅くなる列車を予め避けて行動をするという問題があったが、この分割によって乗客は障害が発生するまでは通常ダイヤを基準に行動を行い、障害発生後に新たな情報を得て行動を再決定するというモデルが作成された。

この分割では、障害が発生すると同時に運転整理案が作成され乗客への情報伝達が行なわれると仮定されたモデルは確立されたが、前節で示した時系列の考慮は不十分である。そこで、運転整理案ができるまでの事象をひとまとめにし、整理案作成に要する時間に相当するダイヤを挿入する。図4.2に、時系列にそって3つのダイヤに分割した状態を示す。図中では「事故発生」と「運転整理案の実施」の2つの時刻において時系列を分割しており、「事故発生」より以前の時刻では通常通りのダイヤを実施し、「運転整理案の実施」以降は作成された運転整理案に従って運行される。この2つの時刻の間の運行が運転整理案に要する時間に相当するダイヤであり、本論文では、この時間の運行計画を「暫定運行計画」と呼ぶ。

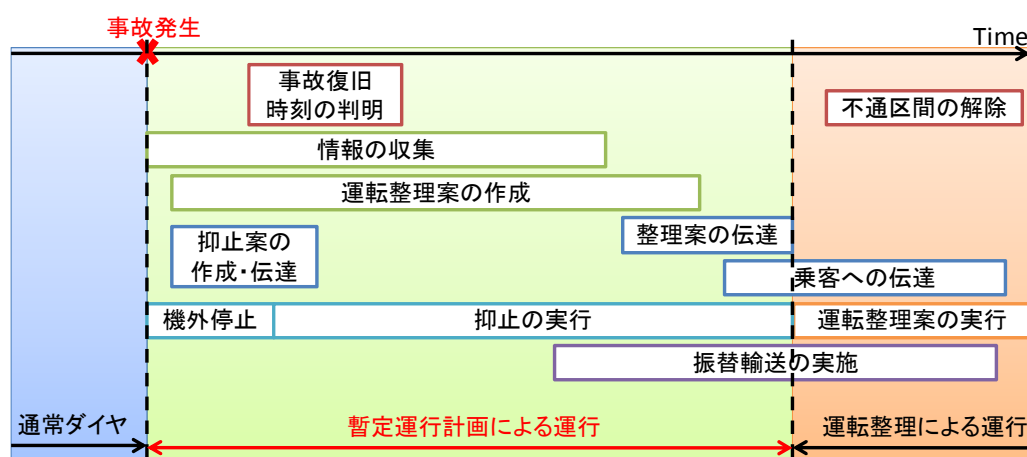


図 4.2: 暫定運行計画の挿入

暫定運行計画中の具体的な運行に関してはこれまで考慮されておらず、本論文では暫定運行計画の作成法について検討する。

4.3 暫定運行計画の運行計画パターン

暫定運行計画は、障害発生直後に行われる運行であることから、瞬時に作成され、伝達・案内が容易にできるものが良い。また、暫定運行計画は運転整理案が作成される前に行われる運行であるため、運転整理の結果に左右される暫定運行計画を最適化することは不可能である。そのため、暫定運行計画に適用出来る手法に、高度な場合分け判断を必要としない定常的パターンが必要とされる。

暫定運行計画は、運転整理のしやすさを目的とした「運転間隔の均一化」と暫定運行計画中に移動が止まる乗客を減らすことを目的とした「運行の確保」という相反する2つの概念を考え、暫定運行計画のパターンを作成する。

そこで、本節では「後続列車を次駅で停止させる」「全列車を次駅で停止させる」「駅間停車を回避しながら運行を継続する」の3つのパターンを考える。

4.3.1 後続列車を次駅で停止させる

図4.3に示すように、事故列車の後続列車を次駅で停車させる。この際、次駅が通過駅であったとしても、ホームがあれば停止させる。事故列車の前方を行く列車は、暫定運行計画中は通常通りの運行を行う。

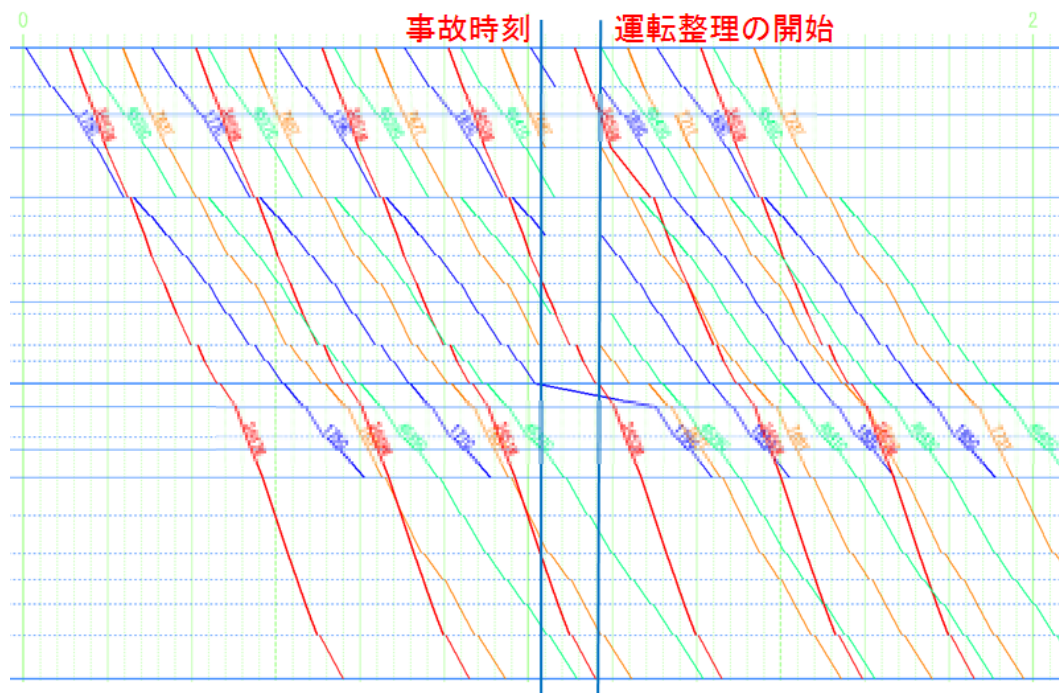


図 4.3: 後続列車を次駅で停止させる

この方法を用いると、運転整理開始時に事故発生地点の前方の列車は疎の状態となるが、事故箇所の前方の客をとりあえず輸送することができる。この手法は、先行研究において考えていたパターンである。

4.3.2 全列車を次駅で停止させる

図 4.4 に示すように、事故列車の前後に関わらず、一度全列車を次駅で停車させる。この際、次駅が通過駅であったとしても、ホームがあれば停止させる。

この方法を用いることにより、停車時間の増加により駅で待たなければいけない乗客は増加するが、運転整理開始時に列車間隔が均一な状態に置くことができる。

4.3.3 駅間停車を回避しながら運行を継続する

図 4.5 に示すように、運転整理を開始する時に、いずれかの駅にいる条件の下で、列車をいけるところまで運行を継続させる。この際、臨時停車は無いものとする。支障箇所の前方の列車は通常通りの運行を継続する。

この方法を用いると、支障箇所の後ろが密な状態になってしまうが、暫定運行計画中の輸送力は確保できる。

以上の3つのパターンを用いて次章でモデル路線に適用し検証を行う。

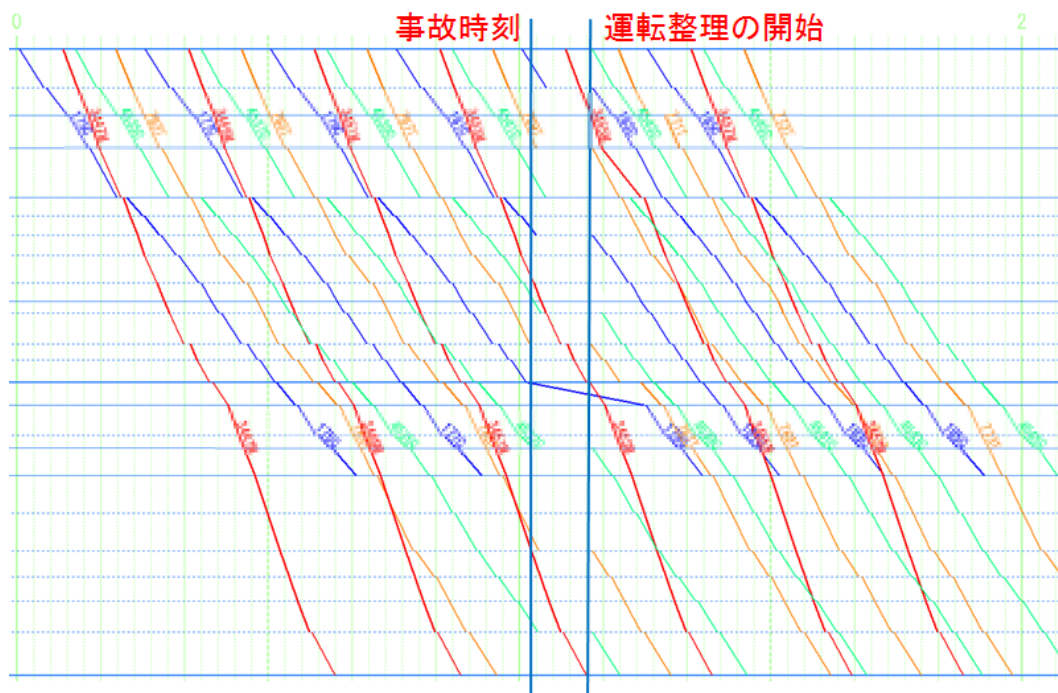


図 4.4: 全列車を次駅で停止させる

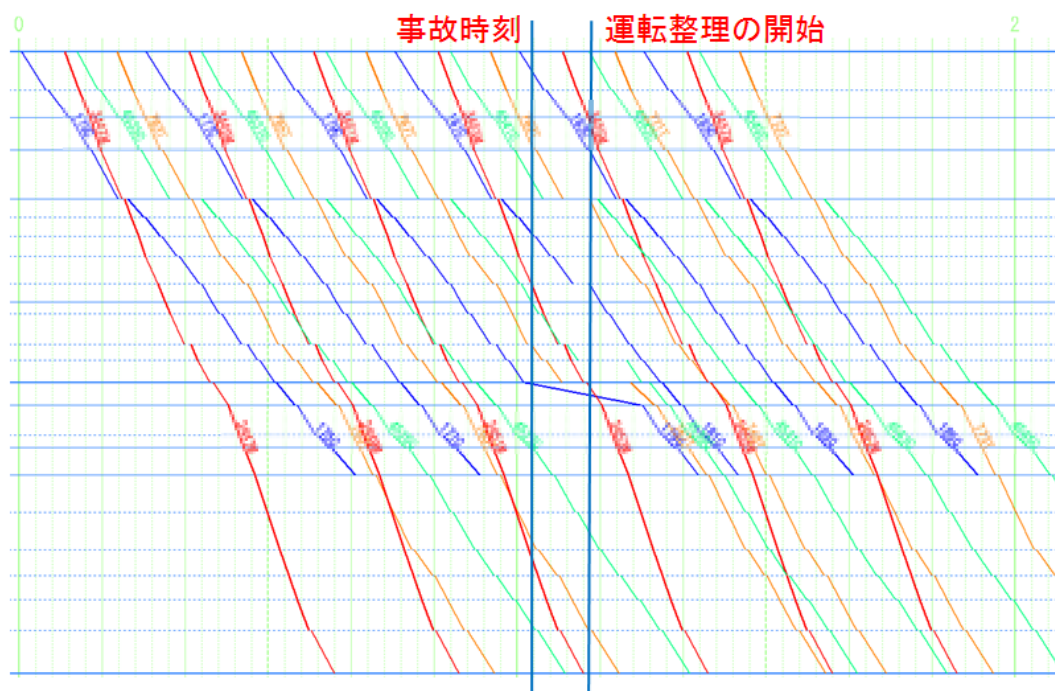


図 4.5: 駅間停車を回避しながら運行を継続する

第5章 暫定運行計画における運行計画作成法

本章では、前章で述べた暫定運行計画のパターンをモデル路線に適用して検証を行い、実際に暫定運行計画を作成する方法について述べる。

5.1 停車時間増加に対する乗客の損失の変化

先行研究 [6] において、時隔調整を行う際に乗客の受ける損失の変化を考慮しており、暫定運行計画を決定する際にも乗客の受ける損失の変化を考える。

列車順序に変化がない場合、駅 s において列車 t が x 秒停車時間が増加したときの影響を受ける乗客を図 5.1 に示す 4 つの場合にわけて考える。

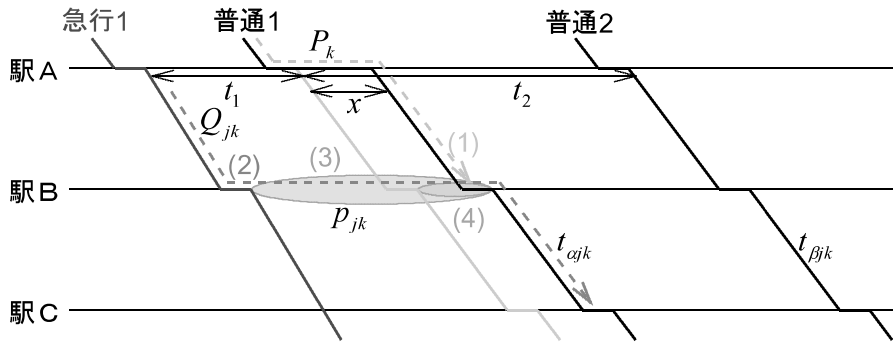


図 5.1: 停車時間増加により影響を受ける乗客

1. 列車 t に s 駅より前に乗車し s 駅よりも先まで行く乗客

駅 k まで乗車する乗客の損失変化の合計は、 k 駅まで乗車する人数を P_k (人)、 s から駅 k の間で設定されている余裕時分を τ_{sk} (秒) とすると T_1 (人・秒) で表される。

$$T_1 = \begin{cases} P_k(x - \tau_{sk}) & (x - \tau_{sk} > 0) \\ 0 & (x - \tau_{sk} \leq 0) \end{cases} \quad (5.1)$$

2. 列車 t に s 駅以降の駅で乗り換える乗客

駅 n で列車 t に乗り換え駅 k まで行く乗客の損失変化の合計は、該当人数を Q_{nk} (人) としたとき T_2 で表される。

$$T_2 = \begin{cases} Q_{nk}(x - \tau_{sk}) & (x - \tau_{sk} > 0) \\ 0 & (x - \tau_{sk} \leq 0) \end{cases} \quad (5.2)$$

3. s 駅以降が出発駅の乗客

第3章で述べたように、本研究では乗客は出発駅に均一な間隔で出発駅に到着するモデルを仮定している。乗客の行動は一意的には決定できないが、乗客の待ち時間と時間の関係を図5.2のようになると仮定する。このとき、乗客の待ち時間による損失の変化は、出発駅 j から目的駅 k まで行く乗客が p_{jk} (人・秒) の割合で駅 j に出現するとすると、以下の T_3 で表される。

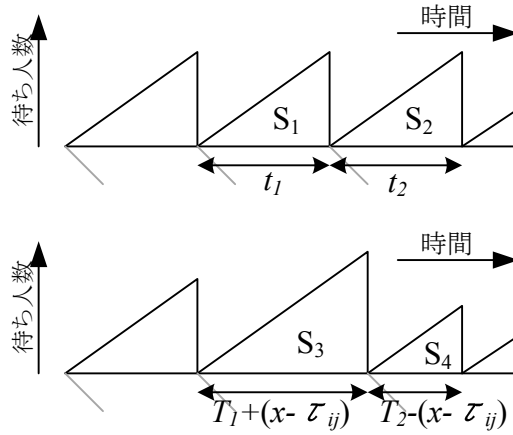


図 5.2: 列車遅延分の乗客の待ち時間損失の変化

$$\begin{aligned} T_3 &= (S_3 + S_4) - (S_1 + S_2) \\ &= -\left(\frac{1}{2}p_{jk}t_{1j}^2 + \frac{1}{2}p_{jk}t_{2j}^2\right) - \left[\frac{1}{2}p_{jk}\{t_{1j} + (x - \tau_{sj})\}^2 + \frac{1}{2}p_{jk}\{t_{2j} - (x - \tau_{sj})\}^2\right] \\ &= -p_{jk}\{(x - \tau_{sj})^2 - (t_{2j} - t_{1j})(x - \tau_{sj})\} \end{aligned} \quad (5.3)$$

4. 列車の遅延により乗車列車が変わった乗客

列車の遅延により、後続の列車に乗る予定だった乗客が遅延列車に乗ることが出来る場合がある。このとき、出発駅 j から目的駅 k までの遅延列車での所要時間を $t_{\alpha jk}$ 、乗車予定だった後続の列車での所要時間を $t_{\beta jk}$ とすると、待ち時間の変化は T_3 で考慮されているため、その所要時間の差が乗客の損失の変化となり、その合計は T_4 (人・秒) で表される。

$$T_4 = \begin{cases} p_{jk}(x - \tau_{sk})(t_{\alpha jk} - t_{\beta jk}) - t_{\beta jk} & (x - \tau_{sk} > 0) \\ 0 & (x - \tau_{sk} \leq 0) \end{cases} \quad (5.4)$$

以上より、 x 秒停車時間が増加することにより発生する乗客の損失変化分を各駅 (駅 1 から駅 N) 間で合計すると以下の $\Delta T(x)$ で表される。

$$\Delta T(x) = \sum_{k=s+1}^N T_1 + \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N T_2 + \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N T_3 + \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N T_4 \quad (5.5)$$

5.2 暫定運行計画中の抑止における影響

図 5.3 のように障害が発生した際運転整理を何も実施せず余裕時分利用して列車を詰めて正常なダイヤに戻すダイヤを「詰めダイヤ」と定義する。

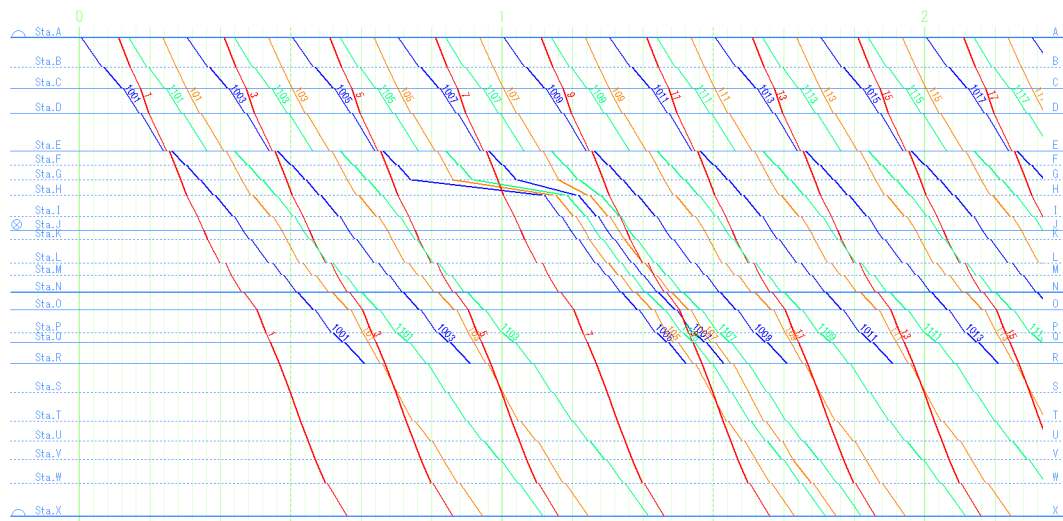


図 5.3: 詰めダイヤの例

暫定運行計画後のダイヤは予めわかっていないため、暫定運行計画を決定する際はこの詰めダイヤを基に作成する。この詰めダイヤで乗客流推定を行い、その推定結果による乗客数を用い、前節で述べた暫定運行計画中の停車時間の増加による乗客の損失変化を考え、その損失が最も少ない暫定運行計画を採用するという手法を取る。

暫定運行計画で列車を抑止することを、抑止している時間分だけ列車が停車時間が増加していると考え、暫定運行計画時間の抑止による詰めダイヤに与える乗客の損失の変化を考える。暫定運行計画中の抑止の行われる抑止のパターンは図 5.4 で示す 4 つのパターンに分けられる。

1. 次駅で停車する場合は、停車増加分の時間は事故発生時刻から最初の停車駅の本来の出発時刻から運転整理開始時刻までの時間となり、この時間を τ_{k1} と表す。
2. 駅間停車を避けて運行継続する場合は、停車増加分の時間は運転整理開始時刻に走っている手前の駅の出発時刻から運転整理開始時刻までの時間となり、この時間を τ_{k2} と表す。
3. 前の駅に列車が停車している場合は、停車増加分の時間は本来出発する時刻から運転開始時刻までの時間となり、この時間を τ_{k3} と表す。

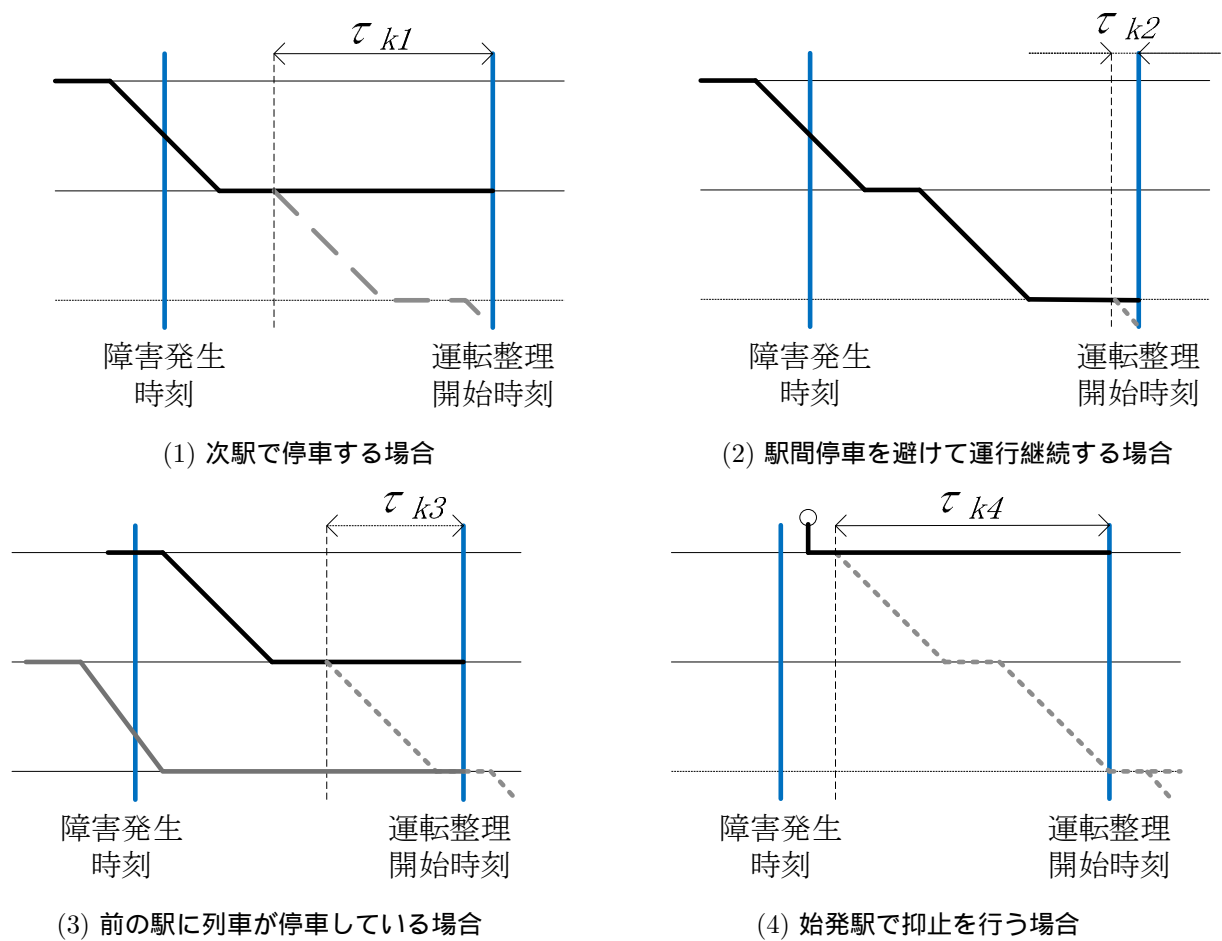


図 5.4: 暫定運行計画中の抑止パターン

4. 暫定運行計画に出発する列車で抑止対象になる場合、停車増加分の時間は本来出発する時刻から運転開始時刻までの時間となり、この時間を τ_{k4} と表す。

ただし、 k は抑止対象の列車を示している。

暫定運行計画の各提案パターンに対し、停車時間が増加する列車を考えそれらの列車の増加時間を τ_{k1} から τ_{k4} を用いて表すと次のようになる。

1. 暫定運行計画中に後続の列車のみ次駅で停車するパターン

抑止対象の列車は事故列車よりも後続の列車のみである。障害発生時刻に事故列車の後続を走っている列車 (図 5.5 の領域 A に存在する列車) k_1 は $\tau_{k_{A1}}$ の抑止を行い、暫定運行計画中に事故発生駅より手前の駅を始発駅として出発する列車 (図 5.5 の領域 C に存在する列車) k_C は $\tau_{k_{C4}}$ の抑止を行う。

よって、後続の列車のみ次駅で停車するパターンの損失和は ΔT_1 で表される。

$$\Delta T_1 = \sum_{k_A}^{area A} \Delta T(\tau_{k_{A1}}) + \sum_{k_C}^{area C} \Delta T(\tau_{k_{C4}}) \quad (5.6)$$

2. 暫定運行計画中に全列車を次駅で停車するパターン

抑止対象の列車は障害発生時に運行している列車および暫定運行計画中に始発駅を出る列車である。障害発生時刻に運行している列車 (図 5.5 の領域 A と領域 B に存在する列車) k_{A+B} は $\tau_{k_{A+B1}}$ の抑止を行い、暫定運行計画中に始発駅として出発する列車 (図 5.5 の領域 C に存在する列車) k_C は $\tau_{k_{C4}}$ の抑止を行う。

よって、後続の列車のみ次駅で停車するパターンの損失和は ΔT_2 で表される。

$$\Delta T_2 = \sum_{k_{A+B}}^{area A + area B} \Delta T(\tau_{k_{A+B1}}) + \sum_{k_C}^{area C} \Delta T(\tau_{k_{C4}}) \quad (5.7)$$

3. 暫定運行計画中に運行を継続するパターン

対象となる列車は運転整理開始時刻に事故列車の後続にいる列車 (図 5.5 の領域 D に存在する列車) である。このうち事故列車から n 本後ろを走行する列車が事故発生箇所から m 駅手前の駅と $m-1$ 駅手前の駅を走行しているとすると、 $n > m$ の場合はその列車は事故発生箇所から n 駅手前の駅で停車し、 $n \leq m$ の場合はその列車は事故発生箇所から m 駅手前の駅で停車する。事故列車から近い順に考え、通過駅であった場合停車駅までの駅数分 m を増加することで対応する。

このとき、運行を継続するパターンの損失和は ΔT_3 で表される。

$$\Delta T_3 = \sum_{k_{D1}}^{area D(n > m)} \Delta T(\tau_{k_{D13}}) + \sum_{k_{D2}}^{area D(n \leq m)} \Delta T(\tau_{k_{D22}}) \quad (5.8)$$

この ΔT_1 、 ΔT_2 、 ΔT_3 を比較し、最も損失の増加が小さいパターンを暫定運行計画として実行するとする。

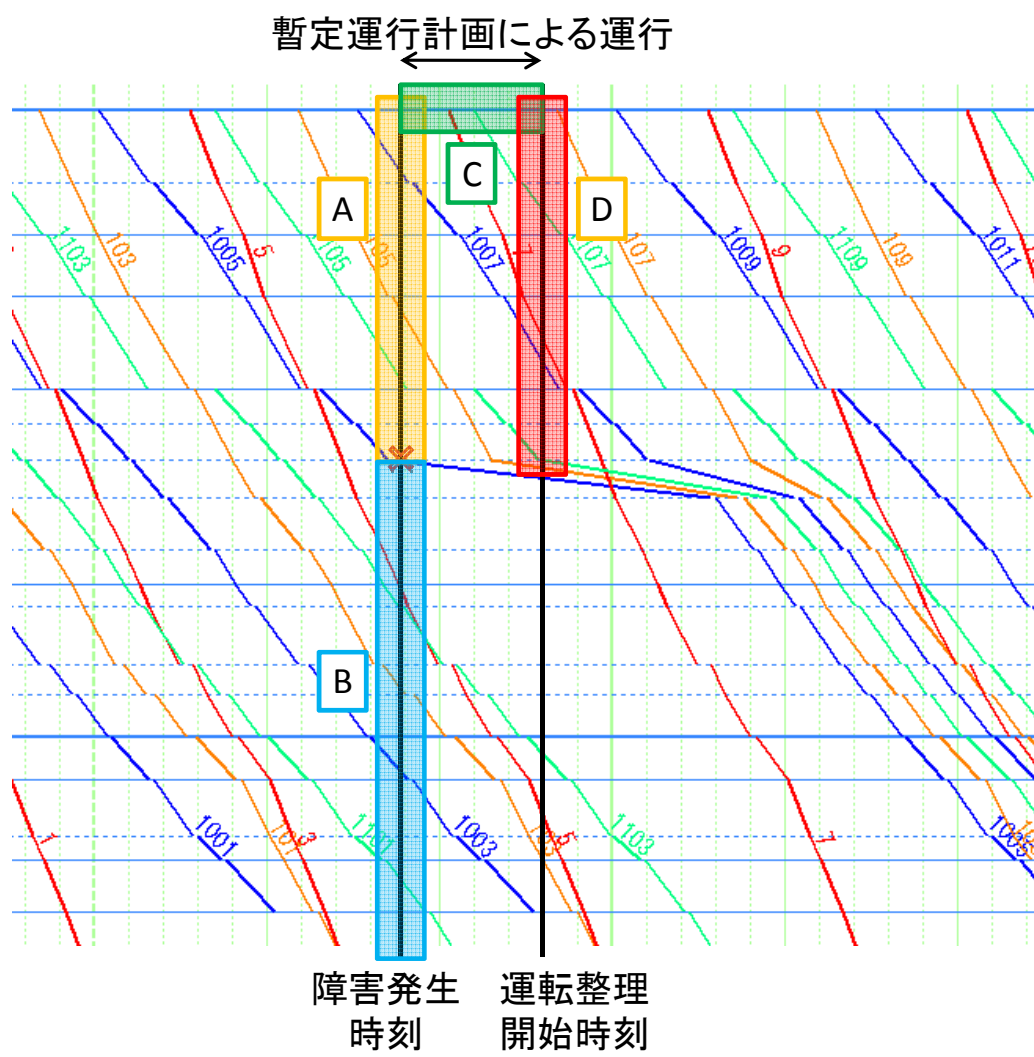


図 5.5: 詰めダイヤにおける列車配置

5.3 モデル路線による暫定運行計画決定法の検証

5.3.1 モデル路線によるシミュレーション条件

まず、障害箇所と障害によって不通になっている時間の影響に関してモデル路線にて適用を行う。モデル路線の 3 時間ダイヤにおいて、緩行線走る列車番号 1009 の普通列車が遅延した時にそれぞれの暫定運行計画パターンを確認し、評価値を調べた。

障害発生区間を (a)D 駅と E 駅の間、(b)G 駅と H 駅の間、(c)L 駅と M 駅の間、(d)P 駅と Q 駅の間の 4 つを設定し、障害復旧までにかかる時間を (ア)600 秒、(イ)1200 秒、(ウ)1800 秒、(エ)2400 秒の 4 つを設定し、それらの組み合わせの 16 種類の遅延条件を設定し、それぞれの場合に対し 3 つのパターンを適用する。

障害発生から運転整理案開始までの時間は、障害復旧までにかかる時間に関係なく 500 秒であるとし、障害発生から 500 秒後に障害復旧見込み時刻を加味した運転整理を実行するものとする。障害が発生して緩行線に不通区間が生じている間も急行線は運行可能であるとする。

用いる運転整理手法は、待避変更、着発線変更、運転線路変更、番線使用順序変更、時隔調整とし、図 5.6 に示すような山登り法を使い適用するものとする。

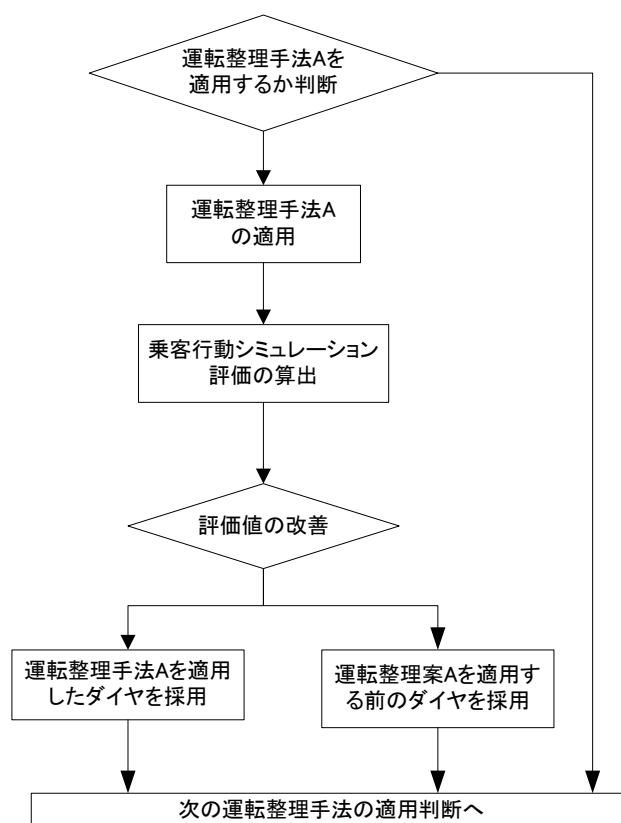


図 5.6: 運転整理手法適用の山登り法

5.3.2 モデル路線によるシミュレーション結果

提案手法をモデル路線に適用した時の ΔT_1 、 ΔT_2 、 ΔT_3 のそれぞれの値を図 5.7 に示す。また、それぞれの暫定運行計画を採用したときに実際に運転整理案を出した時の評価値を図 5.8 に示す。

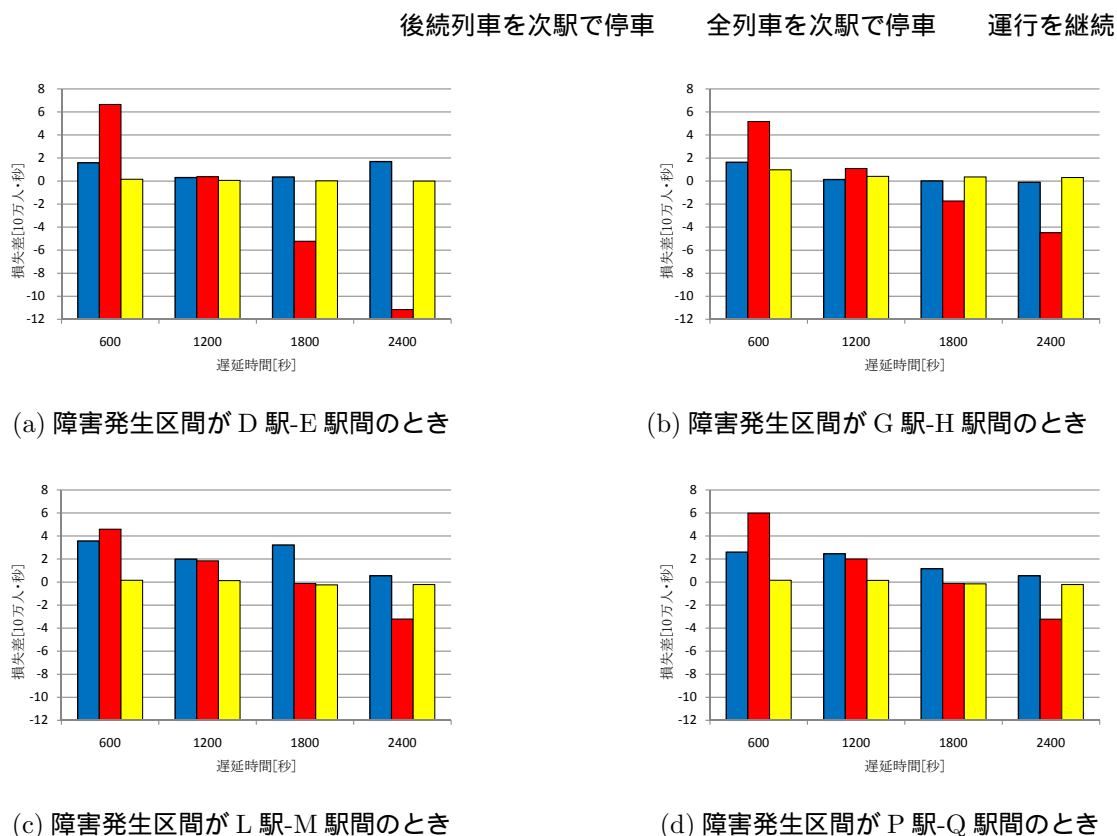


図 5.7: 暫定運行計画による損失差の違い

今回シミュレーションを行った 16 パターンの障害条件のうち提案手法での損失差の大小と実際に暫定運行計画を適用して評価値を比較したときの総損失の大小の順位の分布を表 5.1 に示す。16 パターン中 10 パターンにおいて提案手法で計算した結果から選択する暫定運行計画パターンと実際の結果で最良の運転整理案となった時の暫定運行計画パターンが一致した。また、実際に総損失が最小となる暫定運行計画パターンを提案手法で最大と判別したり、逆に最大となる暫定運行計画を最小と判別することは 0 パターンであった。

表 5.1: 提案手法と結果の比較

		実際の結果		
		最小	中間	最大
損失差	最小	10	6	0
	中間	6	6	4
	最大	0	4	6

大小関係を誤判断をした場合について調べると、「後続列車を次駅で停車させるパターン」 < 「運行を継続するパターン」と判断したものが 3 件、「後続列車を次駅で停車させるパターン」 < 「全列車を次駅で停車させるパターン」と判断したものが 4 件、「運行を継続するパターン」 < 「全列車を次駅で停車させるパターン」と判断したものが 3 件であった。そのことから、「後続列車を次駅で停車させるパターン」 < 「運行を継続するパターン」

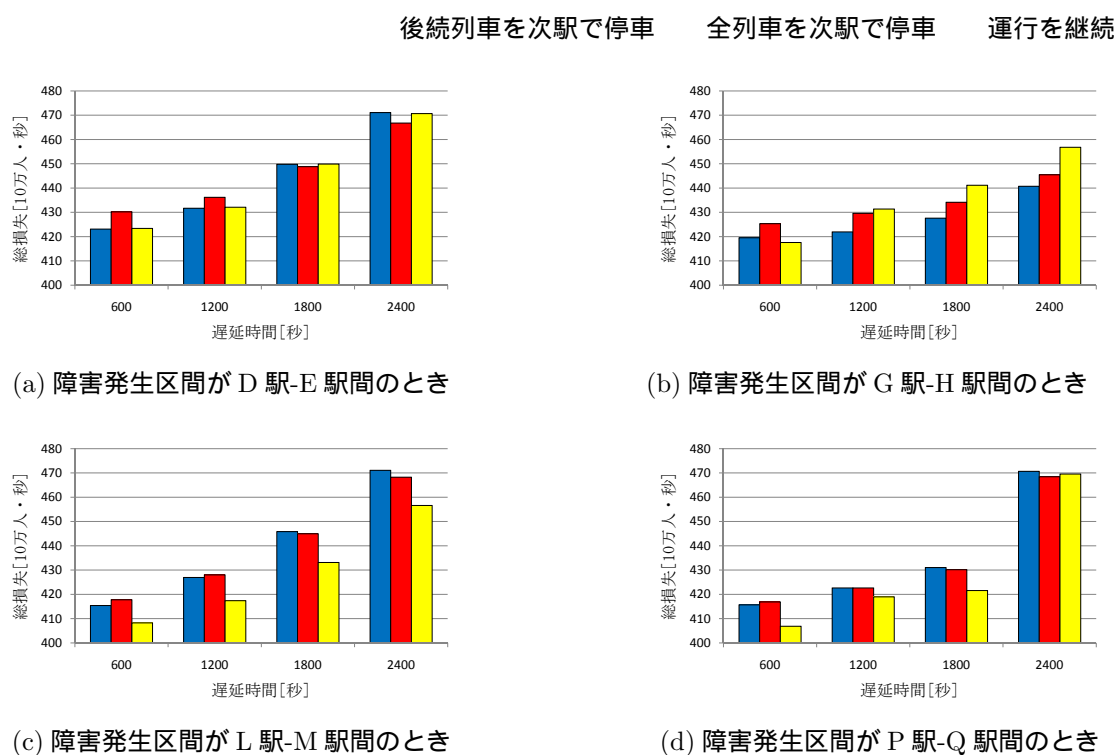


図 5.8: 暫定運行計画による評価の違い

＜「全列車を次駅で停車させるパターン」の順になる傾向にあるようにも考えられるが、運転整理案に用いる手法により、実際の評価値は変化する複雑な問題であるため、本論文では各パターンの評価値の大小関係に定性的な傾向があるかどうかは具体的研究の範囲外とする。

5.4 まとめ

図 5.9 に、先行研究で行われた後続列車を次駅で停車するパターンを採用した時と、本研究で提案した手法で暫定運行計画を採用した時とで運転整理を行った時の評価の比較を示す。一部、従来パターンの方が良い評価値を示したケースもあるが、すべてを平均すると 29 万人・秒の評価値の改善が見られる。これにより、暫定運行計画のパターンを乗客の損失差を用いて決定する手法は有効であると言える。

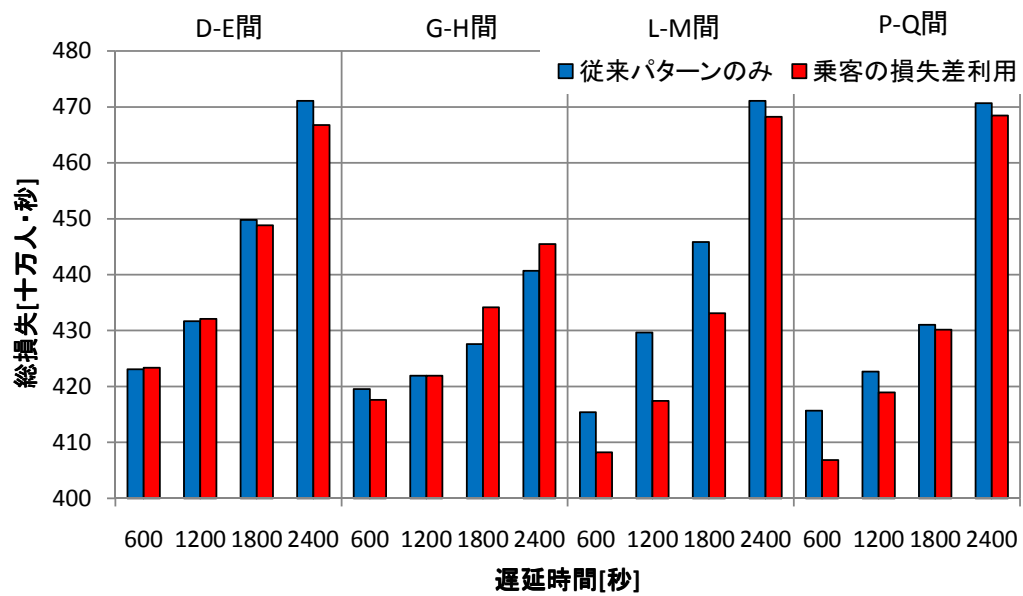


図 5.9: 先行研究における手法と提案手法の比較

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方法について述べた。先行研究において作成された運転整理支援システムをより実用的なものとするために、乗客行動仮定の改良と運転整理案作成までの間の運行に関する提案を行った。

(1) 複数経路を考えるアルゴリズムを用いた乗客流推定方法

これまで評価を決定するための乗客流の推定は、乗客が所要時間と乗換の損失による不効用が最小となる経路を選択すると仮定していた。そこで、乗客の行動仮定を最小となる経路以外に不効用が小さい経路を確率的に選択するモデルに置き換え、モデル路線において各列車の乗客数の変化と評価値への影響を調べた。

乗客行動モデルを複数経路から確率的に選択するモデルへと変更することにより、乗客の偏りが減少し、不自然な人の移動を防ぐことができた。また、乗客が分散して乗るということで、陰に混雑の影響を含んで乗客が行動するモデルを考えることが可能となり、混雑率の高い場合においては、評価値に大きく影響することが確認できた。

(2) 暫定運行計画の計画作成法

先行研究において運転整理案作成の時間を考慮するシステムの拡張を行ったが、運転整理案作成の時間中の列車運行については未着手であった。本論文では、その間の運行計画をパターン化し、どのパターンを採用するかを詰めダイヤを基にした乗客の損失の変化を考える事で作成する方法を提案した。モデル路線において各パターンを用いて運転整理案を作成した時の評価値と提案手法によって選択された運行計画とを比較し、提案手法の効果を確認した。

その結果、先行研究において考えていた後続の列車を停止させるパターンのみを用いた場合と比較して、多くの場合で評価値の改善が見られ、その効果が確認できた。これにより、運転整理案作成の時間を考慮した上で、その間の運行について簡易的なパターンで作成することが可能となった。

6.2 今後の課題

ここまでに示した事項を含め、今後取り組むべき課題を以下に挙げる。

(1) 運転整理手法適用順序の最適化

複数の運転整理手法を適用するシステムとして、第5章に示したようにそれぞれの運転整理手法を適用する順序を固定した山登り法を用いて適用している。しかし、これらの運転整理手法は互いに影響を及ぼしあうため、運転整理手法の適用順序により結果が異なるものが出てくる可能性が高い。

(2) 両方向に対応した運転整理

実際の運転整理の現場においては、まず運休する列車を決定してから運転整理を行うことが多い。本システムでも手動で運休列車を設定し、そこから運転整理を適用することは可能であるが、運休を利用する場合の制約を考えることはできない。また、本研究においても終着駅まで行った列車の折り返しに充てられる列車への影響は十分に検討を行っていない。部分運休や折り返し列車への影響を考慮するためには、両方向に対応した運転整理ができるようにモデルを変更する必要がある。

(3) 迂回路および振替輸送の考慮

本研究のモデル路線においては、他線区や他社間との乗り入れがなく、振替輸送の手段もない路線を仮定している。実際の路線では、乗客が全員運転再開を待つということは現実と乖離しており、迂回路を利用する乗客や振替輸送を利用する乗客を考慮することにより、より厳密な乗客流推定ができると考えられる。本研究で導入した、複数経路を考慮した乗客流推定を用いることにより、迂回した時に受ける不効用と、運転再開を待つ場合の不効用の比較で乗客流の推定が可能になると考えられる。しかし、運転整理案の評価を現存のモデルを用いて行くと、迂回する乗客の不効用が加味できないことになる。そのため、評価方法を改良しなければならないと考えられる。

参考文献

- [1] 国土交通省 鉄道局ホームページ：「鉄軌道輸送の安全にかかわる情報（平成 20 年度）」,
<http://www.mlit.go.jp/common/000050909.pdf>
- [2] 財団法人 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)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 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の評価・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)
- [7] 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々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)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [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] Martins E.Q.V., Pascoal M.M.V., Santos J.L.E. : “The K shortest paths problem”, Research Report, CISUC (1998)
- [12] A.Tuchscherer : “Dynamical configuration of transparent optical telecommunication networks”, Operations Research Proceedings 2004, pp.25-32 (2004)
- [13] 平井 力・富井 規雄：「運転整理案評価のための列車別乗車人員推定手法」, 鉄道総研報告 第 14 巻第 7 号 2000 年 7 月, pp.43-48 (2000)

本研究に関する発表文献

国際学会

1. **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) ,June 2009.
2. **S. Tanaka**, K. Chigusa, M. Fukuchi, T. Koseki : “Method to Generate and Classify Tentitive Train Schedule for Keeping the Time to Search an Optical Plan in Computer-aided Train Rescheduling”, The 12th World Conference on Transport Research(WCTR2010), July 2010. (発表予定)

国内学会

1. 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 年度電気学会全国大会, vol.5 pp.141-142, Mar. 2009.
2. 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 年度電気学会全国大会, vol.5 pp.143-144, Mar. 2009.

謝辞

本研究を勧めるにあたり、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仮定としての2年間、研究に向かう姿勢や進め方を懇切丁寧に指導頂きました。また、学会発表や国内外のお客様と接する機会を数多く設けていただき、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。

曽根悟東京大学名誉教授、工学院大学の高木亮准教授、上智大学の宮武昌史准教授、千葉工業大学の富井規雄教授には運転整理共同研究会の話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、研究を進める上で非常に価値のあるものとなりました。共同研究打合せの場においては、JR西日本の泉利幸様、湯上佳治様、中根秀起様、長岡俊男様や、鉄道総合技術研究所の後藤浩一様、福村直登様、中村達也様、平井力様、浅見雅之様、國松武俊様には、鉄道事業者や鉄道の専門家の立場からの的確なご指導や、列車の運行や運転整理に関する貴重な資料や説明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頂きました。

運転整理の研究の先輩である熊澤一将さんには、鉄道の基礎の部分から現在の研究に関することまで多くのことを教えていただきました。また、研究に関すること以外の相談もさせていただきいつもお世話になりました。運転整理に関する研究の後輩にあたる千種健二君と福地正樹君は、私の力不足により的確なアドバイスもできずご迷惑をおかけした事もあるかと思いますが、会議の取りまとめや研究における議論相手などいつもありがとうございました。今後運転整理に関する研究が彼らの研究によって更に進展することを期待しています。

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。コンピュータ環境の整備や研究の相談など、研究を進めて行く上でも多大なるご指導をいただき本当にお世話になりました。来年度も古関研究室を引っ張って行ってください。小幡寛さんには、情報理工学系研究科の先輩として大学院生活を送る上でのアドバイスをくださり、いつも研究室の雰囲気を作り良いものにしてくださいました。野田昂志さんには、研究室内の座席が隣だったこともあり、迷惑ばかりおかけしましたが、いつも相談やアドバイスをくださりました。Genevieve Marie Pattersonさんには、英文のチェックをしていただいたり、海外の文化を教えていただいたり、いつもありがとうございました。

同期の槻木澤佑公君には、研究の苦労や研究に対する議論を共に行い、時には研究室ナイでの雑談など楽しい研究室生活を送ることができました。鉄道の知識についても詳しく、いつも教えて頂くことばかりでしたが、研究を進める上においても非常に有意義なものとなりました。

杉本貴大君、早山和弥君、佐藤功一君、申重變君、川上千幸君、櫻井大輔君、迫健太郎君、原崇史君には、いつも研究室の仕事をさせていただいたり、雑談の相手をしていただいたり、いつもありがとうございました。申君は私自身がチューターであるにも関わらず十分にその役割を果たすことができず申し訳ありません。

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、いつも研究室を盛り上げてくださるムードメーカーとして学生と接していただき、研究室生活を良い思い出とすることができました。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でお世話になるだけでなく、研究室を楽しい会話で盛り上げていただきました。

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、謝辞と致します。

平成 21 年 2 月 9 日

田中 峻一

付 録 A MPS Algorithm

A.1 MPS アルゴリズムの概要

MPS アルゴリズムとは、1998 年に Martins、Pascoal、Santos によって提唱されたアルゴリズムである。目的ノードに根をもつ最短パス木を作成し、最短経路から派生する経路を考え、その中で最小のパスを探す方法である。 k 番目にコストが小さい経路を求める MPS 法のアルゴリズムは次の通りであり、その概略を図 A.1 に示す。

MPS アルゴリズムの手順

1. 最短パス木 T を求め、出発ノード s から目的ノード t への最短パス p_1 を求める。
2. 任意のノード i に対して i から t への最短パスのコストを π_i とするとき、アーク $(i, j) \in E$ に対して、"reduced cost" を以下の式 (A.1) で定義する。

$$\bar{c}_{ij} = \pi_j - \pi_i + c_{ij} \quad (\text{A.1})$$

3. 始点番号が等しいアークをグループ化し、始点番号が小さい順に並べる。同一始点のグループ内での並び順は \bar{c} の小さい順に従う。そのように並べたアークを順に a_1, a_2, \dots, a_m とする。
4. 優先待ち行列 X を考え、 $X := \{p_1\}, k := 0$ とする。
5. $X = \phi$ ならばアルゴリズムを終了する。
6. X の候補経路に対し $\bar{c}(p) = \sigma(i, j) \in E(p)$ を考え、 \bar{c} が最小となるパス p を選び、 $X := X - \{p\}$ とする。
7. p がループを含まないならば $k := k + 1, p_k := p$ とし、 $k = K$ ならばアルゴリズムを終了する。
8. p の派生ノードを v_i とする。(ただし、ここで p の派生ノードとは、 $p = p_1$ のときは s を、それ以外の場合は手順 12 で p を X に追加した際の v_i を指す。)
9. p の s から v_i までの部位分パスを p_{sv_i} とする。
10. p のアークのうち、始点が v_i であるアークを a_h とする。
11. v_i が a_{h+1} の始点であり、かつ $p_{sv_i} \diamond a_{h+1}$ がループを含むならば h に 1 を足し、この処理を条件が満たされなくなるまで繰り返す。
12. v_i が a_{h+1} の始点ならば、 a_{h+1} の終点のノードを v_j とし、 T における (v_j, t) のパスを $p_T^{v_j}$ とし、 X にパス $p_{sv_i} \diamond (v_i, a_{h+1}, v_j) \diamond p_T^{v_j}$ を追加する。
13. p における v_i の次のノードを新たな v_i とする。
14. p_{sv_i} がループを含む場合と $v_i = t$ の場合は手順 5 に戻り、それ以外の場合は手順 9 に戻る。

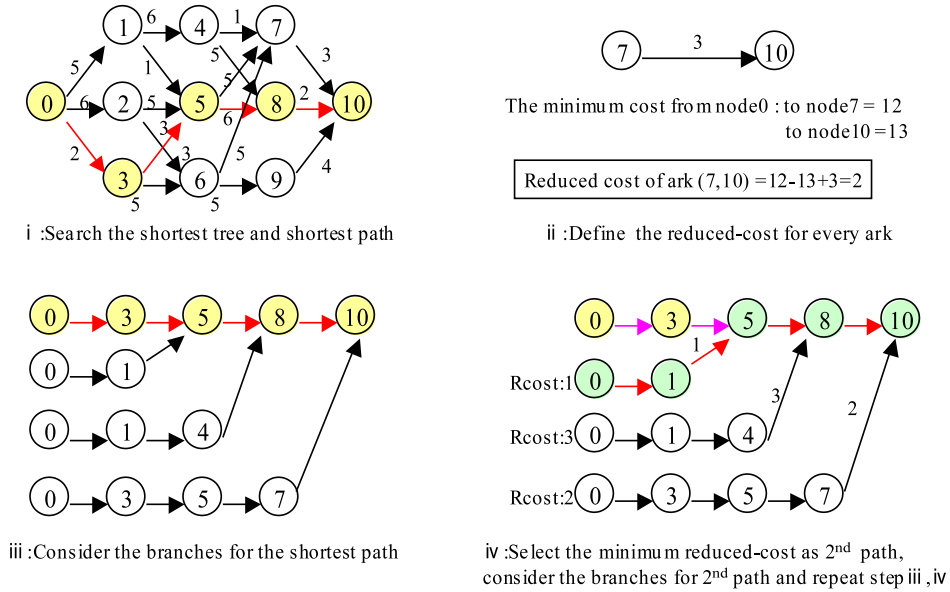


図 A.1: Simplified schematic of MPS Algorithm

A.2 MPS アルゴリズムの証明

なお、この MPS アルゴリズムの正当性については、[11] の中で述べられているが、Tuchscherer[12] によって誤っていることが指摘され正しい証明がなされている。その正しい証明の概略は次の通りである。

MPS アルゴリズムの証明

MPS 法では、手順 6 において優先行列 X から抽出された s から t へ向かう経路 p に対して、手順 7 以降のアルゴリズムが実行され、手順 12 において、 X に複数のパスが追加される。ここでの証明では便宜上追加されるパスを派生パスと呼ぶ。

このとき、次の 3 つのことが言える。

- 1 手順 6 において X から抽出された任意の p における派生パスを q とするとき、 $c(p) \geq c(q)$ が成り立つ。
- 2 常に手順 6 で抽出されたパスを順に q_1, q_2, \dots, q_r とすると、 $l = 1, \dots, r-1$ に対して、 $c(q_l) \leq c(q_{l+1})$ が成り立つ。
- 3 任意のノード v に対して、 $v \neq s$ のとき p' の最後のアーキが T のアーキではなく、かつ $t \notin V(p') - v$ であるとき、 K が十分に大きな値ならば $p = p' \diamond p_T^v$ は 1 度だけ X に追加される。

以上の 3 項より、MPS 法の正当性を導くことができる。

p をループを持たない任意の出発ノード s から到着ノード t までの経路（ただし、 p は s から t までの最短経路ではないとする）とし、 p 上の T 上にはない最後のアーキを (u, v) とする。経路 p の s から v までの部分経路を p' とすると、 p' は上記 3 を満たすため、 p は MPS アルゴリズムによって 1 度だけ算出されることがわかる。この際、2 により、コストの小さい順に探索されることがわかる。