

修士論文

列車遅延時の運行計画変更を反映した 乗客行動を表現する 乗客流推定法と列車運行の評価

平成 19 年 2 月 2 日 提出
指導教官 古関隆章 助教授

東京大学大学院 情報理工学系研究科
電子情報学専攻 56408 大山 大介

内容梗概

鉄道の列車はあらかじめ定められた列車ダイヤに従って運行されるが、事故や障害により運行が乱れたときにはその遅延の波及を最小限にとどめるためにダイヤを適宜変更する運転整理が行われる。

本研究では、運行計画時における乗客流推定を行う先行研究を元に、列車遅延時の列車運行計画変更にもなう、新しい運行計画の提示、情報伝達、乗客の行動決定の因果律を正しく表現できるアルゴリズムを提唱した。そして、運行計画変更時の乗客流解析を行う考え方と、プログラム実装時の問題点およびケーススタディに基づき提案乗客流推定法と従来手法の相違・比較を論じた。

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 運転整理の概要	4
2.2 運転整理システムの構成	6
2.3 従来の運転整理案の定量評価	8
第3章 乗客流推定の方法	11
3.1 乗客流推定の必要性	11
3.2 乗客の立場から見た定量評価法	12
第4章 異常時における乗客流推定	24
4.1 既存の乗客流推定法に存在する問題点	24
4.2 事故予見しない乗客流推定法	29
4.3 実装するアルゴリズムの概略	31
4.4 各機能要素のアルゴリズムの詳細	36
4.5 提案手法の適用例と評価	42
第5章 複数枚の乗客行動グラフを用いた乗客流推定の応用	55
5.1 複数枚旅客案内ダイヤの概念	55
5.2 増延の表現方法の提案	57
5.3 乗客への事故情報の提供に時間を要する場合の表現方法の提案	59
第6章 結論	61
謝辞	62
参考文献	63
発表文献	64
付録	65

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

現在、世界の主要な大都市においては、鉄道が多くの乗客を輸送する重要な交通機関としての役割を果たしている。鉄道は、エネルギー効率が高く、一度に多くの乗客を輸送することができる交通機関である。特に都市部などの混雑地域においては、渋滞によって移動時間が大きく左右される自動車に比べ、高い定時性を有するという利点もある。

一方で、そのような定時性を確保するために、鉄道は多くの複雑な、運行計画における制約条件を必要とする。高速かつ高密度な運転をするために、列車は予め緻密に作られたダイヤに従って運行される。日本の鉄道において、ダイヤは 15 秒単位、線区によっては 5 秒や 10 秒という単位で運行計画が作成されており、さまざまな制約条件を守った上でこのような運行ができるように鉄道のダイヤグラムは組み立てられている。

しかし、現実の鉄道輸送においては、機器の故障や事故発生、もしくは駅における乗客集中によって発車に時間がかかるなどのさまざまな理由によってダイヤが乱れることがしばしば発生する。このとき、列車というものは一本の線路上を走行しているという性質から、容易に迂回走行をしたり、前方列車を追い越したりすることができないために、遅延が発生すると後続列車に直接的に影響が及ぶ。遅延の影響はやがて往復路すべてに波及し、全体の運行計画を破壊してしまうこともある。また、他路線に対しても、さまざまな路線間での接続・乗り入れが行われている場合は、遅れがそちらにも波及する危険性がある。

このようなことが発生しないようにするために、運転整理¹⁾というものが行われる。運転整理とは、ダイヤの混乱を迅速に収束させる目的を持ってダイヤに変更を加える作業のことを示す。変更とは、具体的には、列車の運行順序を入れ替えたり、運休を行ったり、列車の運行種別を変更したりなどさまざまなことを行う。運転整理を適切に行い、ダイヤ全体に及ぶ悪影響をできるだけ少なくし、乗客に不快感を持たせないようにすることが、鉄道の信頼性の向上につながるため、鉄道事業者にとってもきわめて重要なことになっている。

運転整理という作業は、現在は、運転指令所の指令員と呼ばれる専門家によって行われている。指令員は、事故や遅延の状況を瞬時に把握し、全体に生じる影響を考慮した

上で、経験や勘に基づいて手動で運転整理を行う。しかし、瞬時に適切な運転整理の判断を下すためには、ホームの長さや構内配線の構造や、走行している列車の性質、及び乗客がどの駅にどれぐらいいるのかなどのさまざまな知識や予測が必要である。しかもそれを事故該当箇所だけではなく、全体に対して配慮しなければならない。また、事故で停止する時間なども事故の発生当時ではわからないという状況のため、指令員に対する負担は大きい。また、経験や勘に基づくものであるため、定量的な運転整理案の評価ができず、より良い運転整理案を作成するためのフィードバックを行うことや、効率的な運転整理案生成手法の継承を困難にしているという点がある。

また、上記では指令員の視点からの記述を行ったが、よりサービスの質をあげた運行計画を提供するために、利用者の視点による評価を列車の運行に活かすという考えがある。いままでは指令員が列車の遅延などをできるだけ抑えることを主な目標に運転整理案を生成していたが、利用する乗客にとってダイヤがどれだけよいものか、悪いものかということが判断できれば、鉄道事業者によってサービス向上になる。利用者の視点としては、実際にどれだけの乗車時間があるのか、乗換などの手間がどれだけかかるのか、混雑で不愉快な思いをしながら乗車するかなどのが考えられるが、このような情報を定量的に管理して求めようとするのは、人手によっては難しい。また、それらを求めることが仮にできたとしても、実際に運行しなければ求められないのであっては、現状のダイヤの乱れに対する運転整理をどうすべきかという問題に対して対処することができない。ここに乗客がどのように行動するかということを推定する必要があることがわかる。

1.2 研究の目的

曾根・古関研究室では、上記に述べたような運転整理案生成過程が、指令員にとって負担が重く、手法の継承が難しいことからそれらの負担の軽減を目的に、また、利用客にとってより便利な運転整理案とはどういうものであるかを定量的に求められるようにしようという考え方から、運転整理案の自動生成アルゴリズムや、乗客視点からのダイヤの定量的な評価方法を実装し、プログラムに組み込み、計算機によって運転整理案を自動的に生成、評価する運転整理支援システムの研究が行われてきた^{[2][3]}。

本研究では、乗客視点からのダイヤの定量的な評価方法などに必要な乗客の動きをシミュレーションする部分を中心に改善を行う。具体的には、従来のプログラムでは運行計画ダイヤにおいてのみ乗客流の推定が正しく行えたが、列車が遅延し、ダイヤが乱れた状況においては正しい推測を行うことができないという欠点がある。それを解決する手法は、先行研究^[4]で考え方の一部が示されていたが、プログラム実装はできず、手動で処理を行っていた。そのため、本プログラムにおいて重要な点である、乗客視点の

評価値を正しく算出することが困難であったり、複数の路線のダイヤグラムにおいて条件を変化させたケース・スタディを通じて一般的な分析を行うことが困難であったりという問題を抱えていた。

それら問題点を解決するために、異常時においても正しく乗客流の推定ができるプログラムを実装する。手動ではなく、現在のプログラムに実装可能な形のアルゴリズムを提案し、いままでの手法では求めることができなかった評価値も正しく求めることができるようにする。

1.3 本論文の構成

本論文では、まず第 2 章において運転整理システムの全体構造について述べる。鉄道事業者が行ってきた運転整理の仕方や、先行研究で取り扱ってきたプログラムについて述べる。第 3 章では、運転整理支援システムにおいて乗客流推定がどうしても必要かということや、乗客流推定のために必要な乗客行動のモデル化手法について述べる。第 4 章では、乗客流推定における先行研究の問題点を明らかにし、それらを解決し列車が遅延した場合に乗客流推定をどのように行えばよいかについて述べる。第 5 章では、第 4 章で使用した考え方を応用して、乗客推定のための乗客グラフを複数枚利用してさまざまな応用に使う手法について述べる。最後に、第 6 章で全体の考察を行う。

第 2 章

運転整理支援システムの概要

本章では、本研究で使われる運転整理支援システムの全体の構成と各部の概要について述べる。運転整理とはどのようなものか、運転整理が実際にどのような手順を踏んで行われるかを述べ、同時にどのような方法で従来は評価されていたのかについて述べる。

2.1 運転整理の概要

事故やトラブル等で列車のダイヤが乱れたときに、ダイヤの乱れを収束させるために行われるダイヤの変更作業を運転整理という。事故がおきてダイヤが乱れたときに、何も処置を行わず、そのまま進行可能な列車を進行させただけのダイヤを詰めダイヤと呼ぶ。詰めダイヤの状態のままでは、ダイヤが詰まることによって一部分が高密度に運転される一方で、まったく列車が来ない時間が長期に渡って発生するようなことも起きる。このような状況を避けるために、運転整理が行われる。

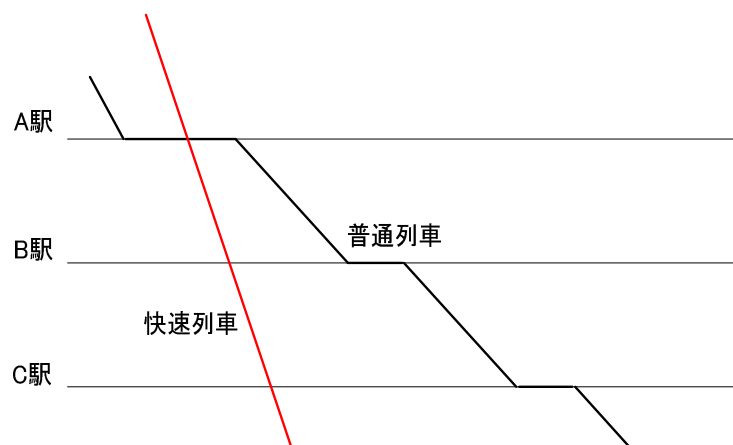
運転整理の一例として待避変更をあげる。急行列車が先行する緩行列車を追い抜く時、先行する緩行列車は駅で待機して追い抜かれる。また、単線区間では対向列車と行き違いをするために待機することがある。こうした待ち合わせが「待避」であり、計画ダイヤ上で、あらかじめどの駅でどの列車がどの列車を待避するのか綿密に決められている。これを行う駅を変更するのが「待避変更」という運転整理手法である。待避が変更されることで、駅の列車の発車順序が変更される。待避駅の変更を行わないと、遅延が発生したときに後続列車が詰まる原因になる。待避変更をすることで、後続の急行列車に遅れが波及することを防ぐことができる。もともと待避関係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、広義の待避変更の一種である。

その例を図 2.1 に示す。図 2.1 (a) は、あらかじめ定められている運行計画ダイヤである。この例では普通列車と快速列車の 2 列車が運行されており、快速列車が A 駅で普通列車を追い越している。A 駅と C 駅にのみ待避設備が存在し、B 駅では追い越しはできないものとする。

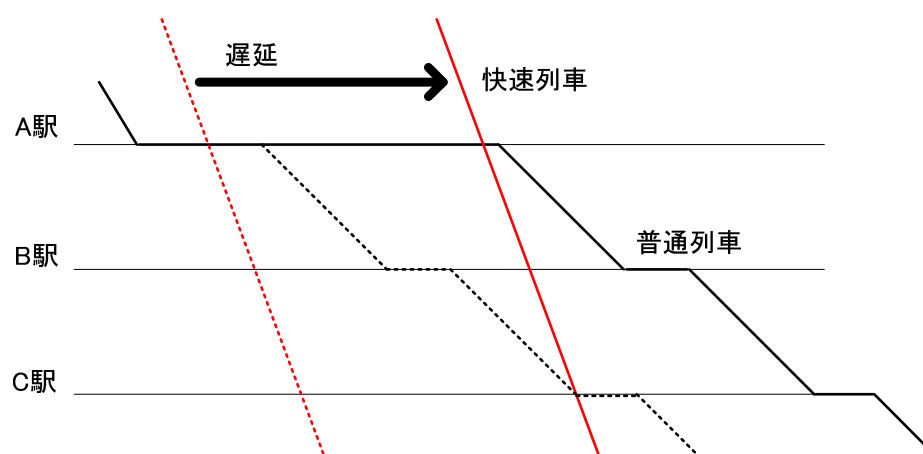
快速列車に遅延が生じた場合、運行計画ダイヤでは A 駅における発車順序が、快速列車が先発で普通列車が後発であると決まっているため、何も処置をせずに詰めダイヤのままで運用を行うと、図 2.1(b) のように遅れていない普通列車を故意に遅らせなけれ

ばならなくなる。

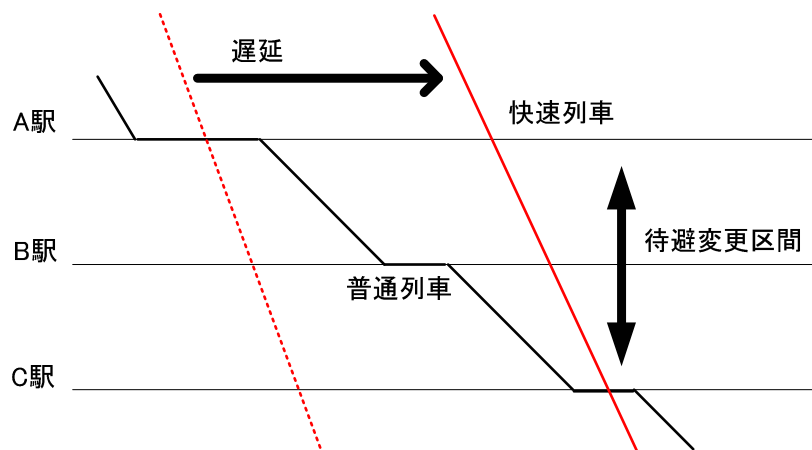
ここで、普通列車への遅延の波及を防ぐために A 駅で追い越す予定であったものを C 駅に変更したのが図 2.1(c)の図である。追い越し待ちのために快速列車が駅間で停車することになっている分の遅延は発生するが、これによって普通列車の遅延を防ぐことができることがわかる。



(a)計画ダイヤにおける待避関係



(b)快速が遅延したままの詰めダイヤ



(c)快速が遅延し、順序変更をおこなった例

図 2.1 順序変更の例

これら以外にも、抑止、時隔調整、着発線変更、運転線路変更、運用変更、運休、特発などさまざまな運転整理手法があり、それらを組み合わせることで運転整理案が作成される。

2.2 運転整理システムの構成

図 2.2 に、本論で用いた運転整理システムの構成を示す。このシステムにおける核となる部分は二つある。第一に、与えられたダイヤを元に適切な操作を行い、新しいダイヤを作成する運転整理案生成機能がある。第二に、運転整理案生成機能によって出力された運転整理案に従い、乗客がどのように行動するかを推定し、ダイヤの定量的な評価を行う運転整理案評価機能である。本運転整理支援プログラムで採用しているダイヤの具体的な評価方法については第三章以降で述べる。

運転整理の開始時には、まず計画ダイヤが入力され、正常時における列車運行ダイヤのグラフが作られる。そして、乗客グラフが列車運行グラフを元につくられ、乗客グラフに対して乗客需要を入れることで乗客流推定が行われ、平常時のダイヤの評価値が算出される。

次に、ダイヤに乱れが生じて運転整理を行う必要ができたとき、さきほど述べたような運転整理を何も行わない詰めダイヤを作成する。そしてそのときの評価値を算出する。

そして、詰めダイヤに対して運転整理支援システムがさまざまな運転整理手法を運行ダイヤに適用し、運転整理後の運行ダイヤを作成する。生成されたダイヤに対して運転整理案評価機能によって乗客流動シミュレーションが行われる。そして、変更したダイヤに対して乗客がどのような経路をとって移動するかが求められる。乗客の経路選択が

判明すると、それによってダイヤの評価値を求めることができる。その評価値は、さきほどの詰めダイヤの評価値と比較され、採用されるかどうか判断される。評価値が悪化するなど、採用した運転整理案がよいものではないと判断された場合は、運転整理案は採用されず変化前のダイヤに戻される。これらの運転整理案の生成、評価及び採用という一連の動作の繰り返しが運転整理システムの中心的な流れを担っている。これらのプロセスをどのように行えばよいかは、先行研究^[5]によって、山登り法や焼きなまし法といった最適化手法の提案や実装が行われている。

この全体の枠組を基本に本論文では、異常時のダイヤの評価を議論する。

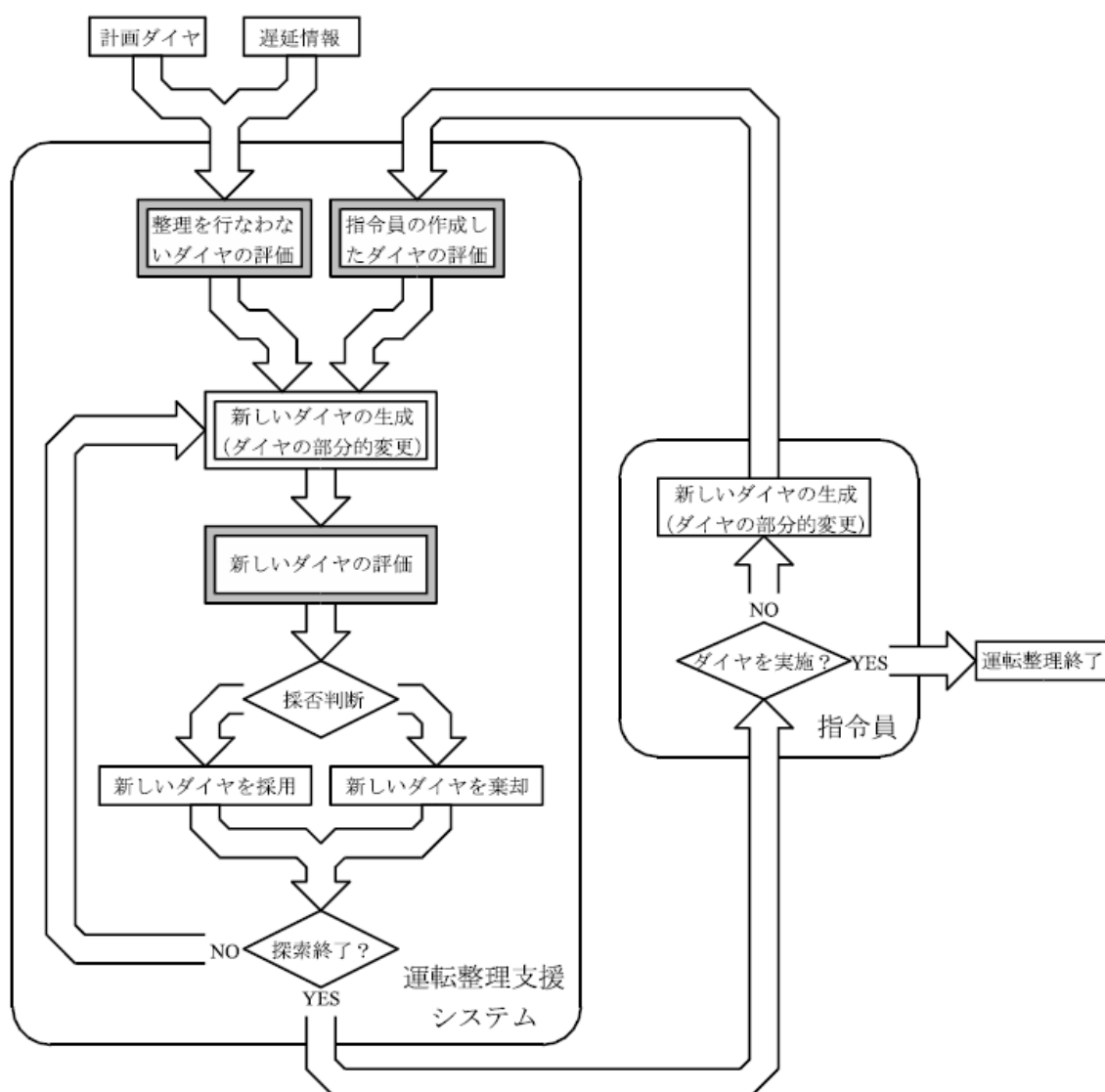


図 2.2 運転整理システムの構成

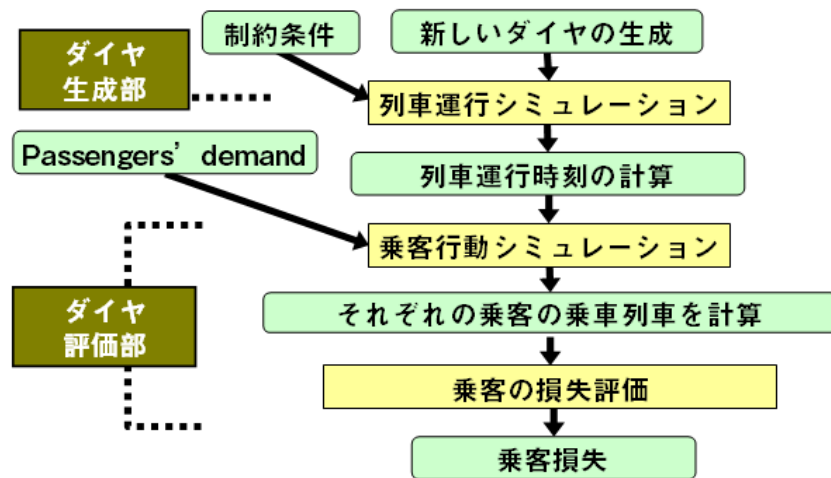


図 2.3 ダイヤ評価の概要

2.3 従来の運転整理案の定量評価

運転整理を計算機で実行するためには、運転整理後の新しいダイヤに対して定量的な評価を行う必要がある。ここでは、従来、鉄道事業者で採用されてきた考えに基づいた運転整理案の定量評価方法について述べる。

従来の運転整理の評価には、列車の運行状況を基準とした、以下のようなものが用いられてきた^{[6][7]}

- ・ 総遅延時間
- ・ 運休列車本数
- ・ 遅延収束に要する時間

総遅延時間は次のように定義される

$$D = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} w_{ts} \{ (a'_{ts} - a_{ts}) + (d'_{ts} - d_{ts}) \} \quad (2.1)$$

ここで、各変数は以下のことを示す。

T : 全列車の集合

S : 全駅の集合

w_{ts} : 列車 t の駅 s における遅延時間の重み

a_{ts} : 列車 t の駅 s における計画ダイヤ上の到着時刻

a'_{ts} : 列車 t の駅 s における実際の到着時刻

d_{ts} : 列車 t の駅 s における計画ダイヤ上の出発時刻

d'_{ts} : 列車 t の駅 s における実際の出発時刻

従来から総遅延時間を算出し、それが小さいほどよい運転整理案である、とする方法がよく用いられてきた。この方法は論理が単純であり、計算機上で求めるためにも列車の運行のみ掲載の対象にすればよいので非常に負荷の低い作業で行うことができる。しかし、これを運転整理の良悪を決める指標にするには疑問がある。例えば、遅れた列車すべてを運休にするような方法をとるとする。この場合、総遅延時間は 0 になってしまうので総遅延時間だけで評価すると、よい運転整理案だと評価される。しかし、現実的に考えてすべての列車が運休してしまっている状態では、乗客は移動することができず、よい運転整理案であるはずはない。また、遅延収束にかかる時間は、遅延している列車に対して運休などの措置を行うことで評価をよくすることができるが、このような整理案は待ち時間や混雑の増加を招く結果になるのは明白で、利用者にとってそれが必ずしもよい運転整理案とは限らない。また、今度は逆に遅延でダイヤが乱れ、列車が止まってしまった場合を考える。運転再開後にホームにたまった乗客を処理するために車庫にある列車を臨時に出すことによって乗客輸送力を高めようとした場合、列車は増加し、詰まる傾向が強まるため、遅延時間は増加する。遅延が増加したため悪い運転整理案だと評価されることになるが、人がたまっているときに列車を増発する方法は、乗客からすれば混雑が緩和されるよい方法であり悪い運転整理手法だと評価されにくい。このように総遅延時間による評価法は、列車の動きだけを見ていて乗客の損失を見ていないものになっており、現実的にはよい運転整理案であるものを見逃す可能性があることがこれらの極端な例から容易にわかる。

運休列車本数による評価では、計画ダイヤと運転整理実施ダイヤを比較することによって運休した列車の本数を算出し、それによって評価を行う。一般的に考えて運休の本数が少なくすめば、輸送力の減少を抑えられたということで評価することができるが、一方で適切な運休をはさむことによってダイヤの乱れをより早期に収束させることができる場合も考えられ、単一の指標としては適当ではない。

これらの問題点を解決する方法として、従来の列車の動きを見る方法以外の手法が求

められるようになってきた。それらを次章で述べる。

第 3 章

乗客流推定の方法

前章では、運転整理の概念と運転整理の従来の評価指標について述べた。しかし、従来の評価指標には、列車を利用する乗客の視点が含まれていないという欠点がある。本章では、そのような欠点に対処するための乗客の動きを基準にした運転整理評価を提唱し、そのために乗客流推定が必要であることを示し、どのようなモデル化を行うのかを述べる。

3.1 乗客流推定の必要性

前章で述べたように、従来は列車の運行というものに着目した運転整理の評価が行われていた。しかし、それには多くの欠点があり、列車を利用する乗客の視点が含まれていないという欠点がある。

そのような問題点を解決するために、先行研究^[2]以来の本研究で使われているプログラムでは乗客の立場から見た評価法を使用する。この方法は、列車の動きではなく乗客の動きに着目し、個々の乗客の受ける損失の総和を評価値とし、それが少ないほどよい運転整理案であると評価するものである。そのような方法によってダイヤグラムを評価することにより、利用する乗客のためのダイヤ作成につなげることができる。

このようなやり方は、理想的に思えるが、従来の鉄道事業者が採用してこなかった。その理由を考えると、

- ・ 評価値をどのような基準で算出したらよいか分からない
- ・ 乗客がどのように行動するかを予測するのが困難

などの理由が考えられる。これらの問題を解決するために、計算機支援による運転整理支援プログラムが開発されて、その中でも乗客流推定が重要な要素として議論とされるようになった。

評価値をどのように設定すべきかは、先行研究などに述べられている。正常時における乗客行動推定は先行研究^[2]で行われている。まず、それを紹介した上で、本研究の目的である異常時の乗客行動推定アルゴリズムについて述べていく。

3.2 乗客の立場から見た定量評価法

前章で述べた従来の評価手法は、いずれも列車の動きから評価を行うものであった。しかし、そのような評価方法では多数の問題が生じるであろうことから、乗客の受ける損失を評価指標とする。それらとして次の3項目を考える。

- ・ 所要時間
- ・ 乗換行動
- ・ 列車の混雑

これらは、単位の異なるものであるので、一般的に円換算、もしくは秒換算することで統一をはかり、それらの合計を損失として扱う。本研究のプログラム実装においては時間換算し乗客の損失時間（秒）として評価量を計算する。

(1) 損失時間

列車の所要時間は、ダイヤを評価する上で最も重要な指標であると考えられる。正常ダイヤの下で運行が行われた場合も、乗客が乗車駅にきてから乗車するまでの待ち時間や目的地以外の駅に停車している時間も損失時間と考える。すなわち、一切の待ち時間なしに出発駅から目的駅まで直行する列車があったと仮定した場合の所要時間を基準として、これに対してかかった時間を損失時間と定義する。これを式で表現すると式(3.1)のようになる。

$$L_1 = \sum_{i=1}^N (t_i - t_i') \quad (3.1)$$

N : 乗客の総数（人）

t_i' : 乗客 i の目的駅への直行時の所要時間（分）

t_i : 乗客 i の目的駅への実際の所要時間（分）

ただし本研究では $t_i' = 0$ とされている。この条件下では、評価値の大きさは変わるが、複数の運転整理案における評価値の差分をとる場合には変わりがなく、差し支えない。運転整理案の評価は、正常時と整理前、整理後それぞれにおけるダイヤの評価値を比較するのが主要な目的であるため、本研究ではこの設定を利用する。

(2) 乗換回数

乗り換えは、実際に乗り換えにかかる時間の損失以外にも、乗客に移動を強いることなどによる損失が発生すると考えられる。従って、乗り換えの所要時間を損失時間として評価する以外に、その回数自体も評価すべきである。ただし、同一ホームで乗り換えが可能な場合と、地下道を渡って別のホームに移動しなくてはならないのでは、乗客の損失は明らかに異なっていると考えられるので、本システムでは乗換一回を損失時間の何秒に値するのかという情報を駅や乗換元ホーム、乗換先ホームをキーとして入力データの形で持たせるようにしてある。式で表現すると式(3.2)となる。

$$L_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{M_i} r_{ij} \quad (3.2)$$

N : 乗客の総数 (人)
 M_i : i 番目の乗客の乗換回数 (回)
 r_{ij} : i 番目の乗客の j 番目の乗換の時間換算値 (分/回)

(3) 混雑度

混雑による損失は、混雑時に1分を何分に感じるか、人間の感覚の非線形性を表した係数(表 3.1 及び図 3.1)を用いて時間に換算し、その混雑を経験した人の人数と時間をかけ、これに時間価値をかけて金額に換算する。これは、式(3.3)のように表現することができる。

$$L_3 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{s=1}^{S_i} \left\{ f_c \left(\frac{q_{is}}{c_{is}} \right) \times q_{is} \times t_{is} \right\} \quad (3.3)$$

n : 駅の総数
 S_i : 駅 i に到着する列車本数
 f_c : 混雑に対する人間の感覚の係数 (表 2.1 参照)
 c_{is} : 駅 i に s 番目に到着する列車の定員 (人)
 q_{is} : 駅 i に s 番目に到着する列車の次駅までの乗客数 (人)
 t_{is} : 駅 i に s 番目に到着する列車の次駅までの所要時間 (分)

表 2.1 混雑に対する人間の感覚の非線形性をあらわす係数

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	$0.0069R - 1.22$

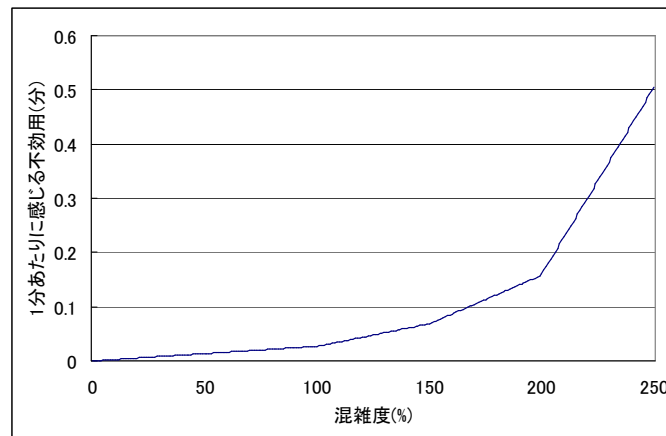


図 2.4 混雑に対する人間の感じる不効用値

時間価値 の値は、乗客の時間当たりの賃金を基にした所得接近法により、都市圏ではおよそ 50 (円/分) と求められている^[8]が、本研究では損失の評価は損失時間 (秒) 換算で評価を行うものとする。

3.2 ダイクストラ法を用いた乗客流動推定手法

本研究で利用するプログラムでは、列車遅延時にどのような運転整理手法を組み合わせ、運転整理案を決定していくかの判断材料に乗客から見た評価値を使うことになっている。そのためには乗客流の推定が必要である。それらを計算機上で実行するためには、ある程度の乗客のモデル化を行うことによって、現実的な時間で評価値を算出できるようにしなければならない。先行研究^[2]では、そのために、乗客の行動選択基準について次のような簡素化を行った。

- ・ 乗客は、予測される所要時間と乗換損失の和を最低限にする経路を選択する
- ・ 運転整理手法適用時には、混雑度による損失を予測することはない
- ・ 混雑度による損失は、最終的に決定された運転整理案に対してのみ考慮する

列車に遅延が生じ、運転整理を行うような場面においては、乗客は混雑を考慮するよりも遅れないように到着することができるかを最優先するものであろうという仮定から、上記のような条件付けを行った。所要時間と乗換回数だけを乗客の配分に利用すると、評価値が最小となる経路の探索に、グラフ理論の世界で一般的に用いられているダイクストラ法を利用することができる

3.2.1 乗客行動仮定

本研究で使われるプログラムでは、乗客は所要時間と乗換回数を評価値として算出して、それが一番少ない経路を選択する、と仮定している。

この仮定で計算を行うと、図 3.1 のように評価値が同一になる経路が複数導出されることがありうる。図 3.1 では、急行は A 駅、C 駅、E 駅のみ停車するとする。この場合、A 駅から F 駅に向かう乗客のうち A 駅で急行に乗っていく乗客は、C 駅または E 駅で乗り換えをする必要がある。C 駅と E 駅の乗換損失が同じであると仮定すると、二つの経路は到着時間が同じのため損失時間も同一で、乗換損失の面でも同様に乗換回数が一回であり損失値も同じであるため、二つの経路は評価値が同一になる。

この場合は、すべての経路に対して乗客を等配分することにする。図 3.1 の例では経路需要を 2 で割った値をそれぞれの経路に割り当てる。

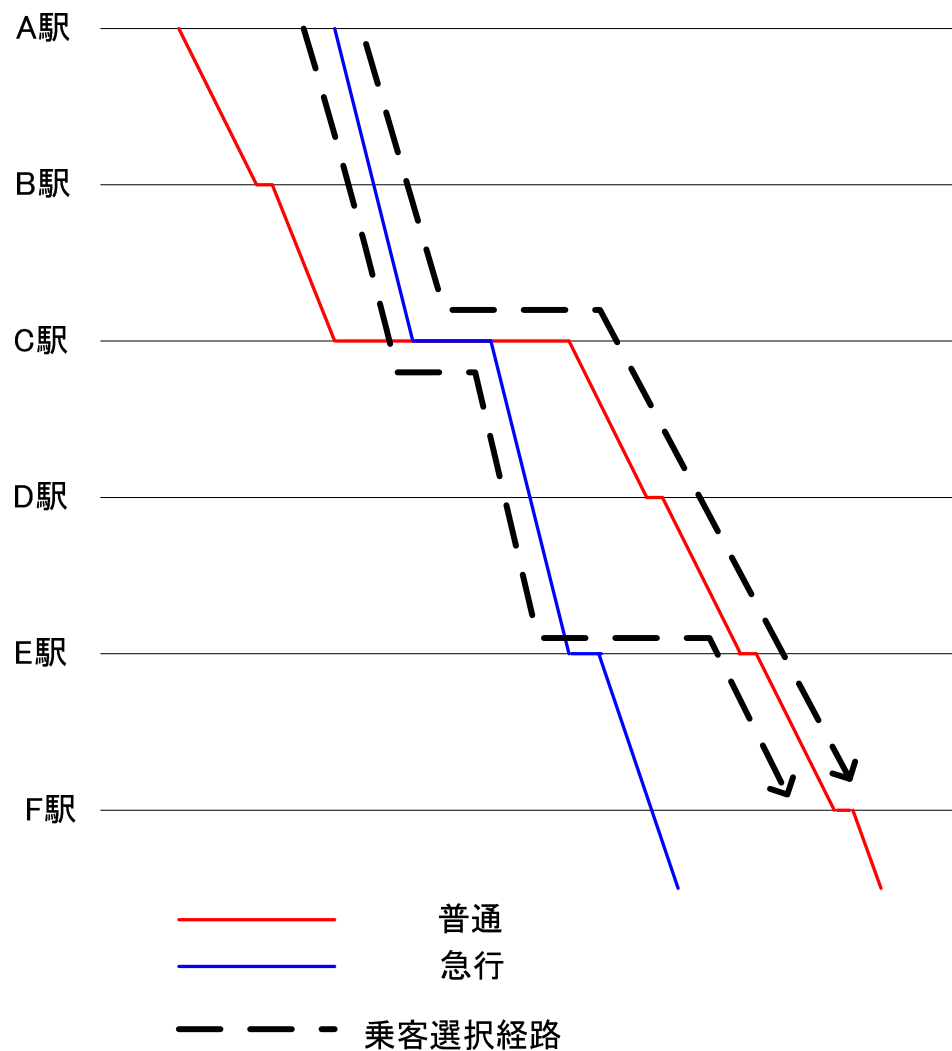


図 3.1 複数の同一経路が存在する場合

3.2.2 2種類の乗客行動モデル

本研究で利用するプログラムでは、乗客行動のモデルとして2種類のモデルを想定できるようにしている。

モデル 1・・・ある駅からある駅に向かう乗客は、均一に出発駅に出現する。最短経路をとることができる列車が来たら、乗車する。出現してから乗車するまでの時間も待ち時間に含める。

モデル 2・・・ある駅からある駅に向かう乗客は、均一に到着駅で消失する。到着すべき

時間が均一に分布されていて、乗客は、あらかじめ最短経路を調べておき、目的地に着きたい時刻から、到着時刻に間に合うような最短経路を逆算し、一番損失の少ない列車を選択する。

モデル1は、都市近郊鉄道の乗客のうち大半を占めているであろうと考えられる、時刻表を見ずに駅に到着し、自らにとって最適な列車が来たらそれに乗車するという形態をモデル化している。モデル2は、長距離を運行する路線や、運行頻度の少ない路線において乗客がとりやすい行動をモデル化したものである。

グラフ作成においては、モデル1の乗客を対象にグラフ構造の作成を行うが、モデル2はモデル1を逆にしただけの構造になっているので、グラフ構造もリンクの向きを逆にすることでまったく同様に作成することができる^[2]。先行研究から使われているプログラムは、都市近郊鉄道における運転整理を考える際には、仕様上は両方のグラフ構造を扱うことができるが、モデル1の採用が実用的なため、本研究ではもっぱらモデル1の乗客を対象に拡張を行った。実装したプログラムの試験運用もモデル1の乗客行動仮定のもとで行う。

3.2.3 グラフ理論を用いた乗客流の表現

ダイクストラ法を適用するために、まず乗客流動を表現するグラフを作成する。グラフは、図3.2のようなノードとリンクで構成される。これは、有向グラフの例で、左のノードが先にあり右のノードが後にあるという順序関係を示すことができる。



図 3.2 ノードとリンク

乗客行動グラフは、時間の流れる向きにのみ乗客が行動できないことを表現するために有向グラフを採用している。ダイクストラ法の探索もリンクの向きにのみ行うものとする。最短経路探索時に使用する評価値は所要時間と乗換損失の和であるので、リンクの重みは所要時間と乗換換算値を採用する。ノードは、乗降に対応するものだけを作成

すればよく、乗降者数の値を保持する。リンクは、出発を表すノードから到着を表すノードへ張るリンクと、到着ノードから出発ノードに張るリンクがある。前者はすべてが列車の走行に起因するものであるので走行リンクであるが、後者は停車リンクに加え、別列車の出発ノードへ移る乗換リンクであることがある。走行・停車リンクは所要時間を重みとして持ち、乗換リンクは乗換換算した不効用値を重みとして持つ。また、重み以外に必要なデータとして、走行時に該当列車内にいた人数、もしくは乗換をする人数のデータを持つ。

図 3.3 に実際の乗客行動グラフの例を示す。実際はこれらのリンクに乗車人数や経過時間などの値が付加される。

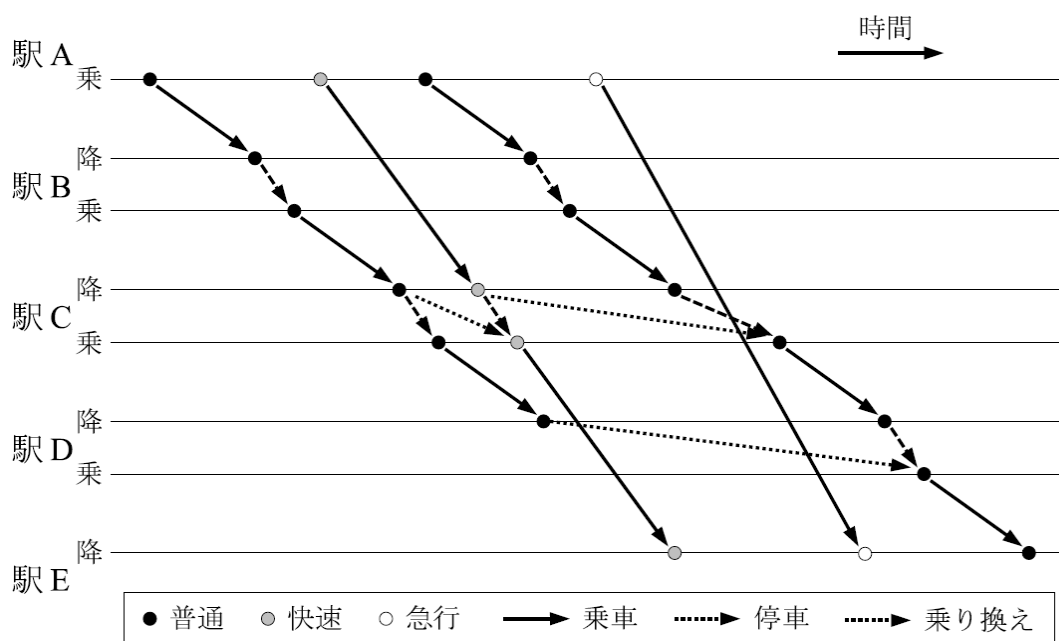


図 3.3 乗客行動グラフの例

3.2.4 ダイクストラ法による最短経路探索

いままでの述べてきたモデルによって、乗客の経路選択は、乗客グラフのリンク上を進むことと同様のこととして表現することができる。このとき、乗客は経路上のリンクの重みの合計が最も小さくなるものを選ぶと仮定することによって、乗客の経路選択問題は、グラフ構造上の最短経路探索問題に帰着することができる。

先行研究から使われているプログラムでは、最短経路探索としてはダイクストラ法を用いている。このアルゴリズムでは、あるグラフ構造にある任意の始点ノードからそれ

以外の全てのノードに対しての最短経路と最短距離を同時に求めることができる。ダイクストラ法のフローチャートは図 3.4 に示すとおりである。全てのノードについて確定ノードを判別するフラグを用意しておき、値が小さいものから一つずつ確定させていく方法である。それぞれのノードは、自身が最短経路を求めるのに使われた先行ノードを記憶しておくことで、それを逆にたどっていけば最短距離だけでなく始点にたどり着くための経路も求めることが可能である。

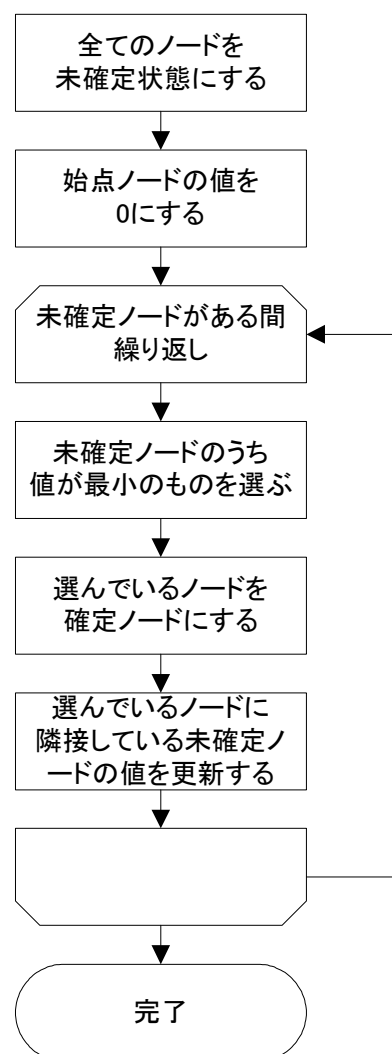


図 3.4 ダイクストラ法のフローチャート

この仕組みを利用して乗客グラフのうち、発ノードからの最短経路を導出する。発グラフからに限定しているのは、乗客が自然発生して乗車する地点が発ノードであり、着ノードからの初期乗車はないからである。よって全てのノードのうちのおよそ半分のノードから最短経路を求めればよい。

但し、後に 4.4.3 など述べる事故後の経路に事故前から乗車している乗客を分配する際に着ノードからの初期乗車が扱えないことが問題となった。予測される問題点と対処法は付録 A に記す。

3.2.5 不適切な経路の棄却

全ての出発ノードからのダイクストラ法による最短経路探索が完了すると、全ての経路表が得られ、前の経路との時間間隔に従って乗客を配分することによって各経路の乗客数が確定する。しかし、この方法で得られた経路の中には不適切な経路が含まれていることがあるので、これらは乗客配分を行う前に検出して取り除かねばならない。

ダイクストラ法によって求められる最短経路は、ある出発ノードから見る限りは必ず最短経路を求めることができる。しかし、他の出発ノードと比較した場合に、経路表全体から見て不適切な経路が導出されることがある。例えば、図 3.5 に示したように、途中駅で急行列車が普通列車を追い抜く場合を考える。駅 A から駅 C に向かう乗客は、先に出発する普通に乗車する最短経路よりも、後に出発する急行に乗車する最短経路を選んだ方が乗車時間も早く、早く目的地に着くのは自明である。最短経路探索のみを行っている状態だと、それぞれの発ノードに乗車した場合の最短経路の解しか出せないため、このような先発の最短経路を選ぶことが全体のダイヤから見て最短ではないという問題が生じる。このようなケースが見つかった場合、ノード α からの駅 A から駅 C における最短経路は、経路クラスから除去する。これによって、ノード β からの経路のみが残り、駅 A から駅 C に向かう乗客はノード α の経路を利用せずに次の列車を待ち、ノード β の列車に乗車して駅 C に向かう。

発ノードからの乗換リンクがあれば、ダイクストラ法を用いた手法でもこの問題を生じないようにすることができる可能性はあるが、プログラムの仕様上、乗換リンクが発生するのは着ノードから発ノードに至る経路のみである。もしそのようなことをしてもリンクの数が無駄に増えるだけで、このプロセスを省略できる効果しか得られないので効率的ではない。

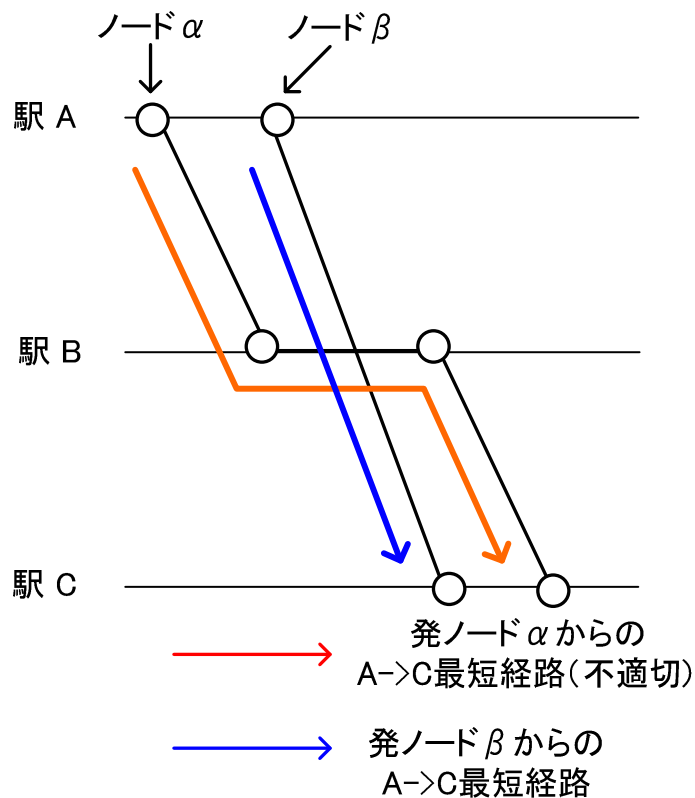


図 3.5 不適切な経路の除去

ここまでは先行研究でも実装されていたことだが、乗換損失について考慮がなされていないために乗客流推定が正しく行われない場合があった。本研究においてはさらに、乗客損失についての考慮を同様なケースにおける経路選択を行う必要性がある場合についての考察を行い、仕様として追加を行った。それを以下に示す。

図 3.6 のようなダイヤがあり、駅 A から駅 E に向かう乗客がいる場合を考える。このとき、経路 A と経路 B の二通りの経路が考えられる。

不適切な経路を除去する前では、図 3.6 のグラフでは各駅停車にも急行にも両方にのれるようなグラフが共存している。先行研究のプログラムでは、不適切な関数を除去するプロセスを介すると、各駅にのる経路が削除される。従来の仕様では、この関数では「後に出発して先発経路を追い抜くようなものをチェックし、後発経路と先発経路で目的地に到着の場合、先発経路は削除する」となっていて、乗換損失は考慮されていない。

このため、その分岐点における条件に、「先発経路と後発経路が到着の場合、乗換損失の大小を比較し、先発経路のほうが、乗換損失が大きい場合のみ、先発経路を削除する」とした。このような条件付けにすることによって、図 3.6 のような例では先発経路 A は残ったままになる。また、図 3.7 のような状況で、駅 A から駅 F に向かう乗客を考えた場合には、経路 A を消して経路 B を残すという結果になった。

これらの改良により、従来は考えられていなかった乗換損失も考慮した最短経路探索が可能になった。それにより、先行研究では優等列車に乘客が集中しがちであった欠点が無くなり、設計思想に沿った乗客流推定が行えるようになった。

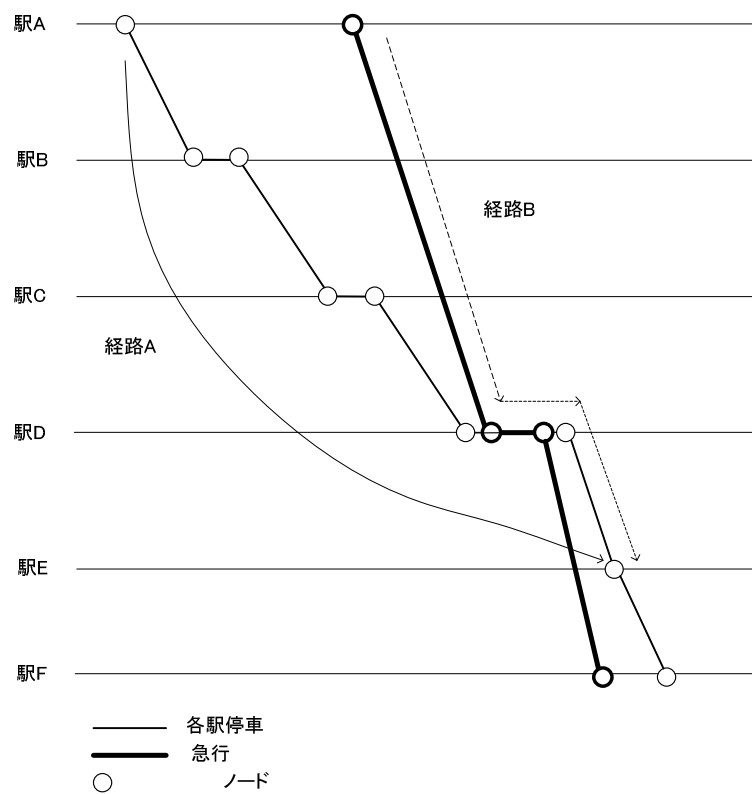


図 3.6 同着で先発経路も有効と見なされる例

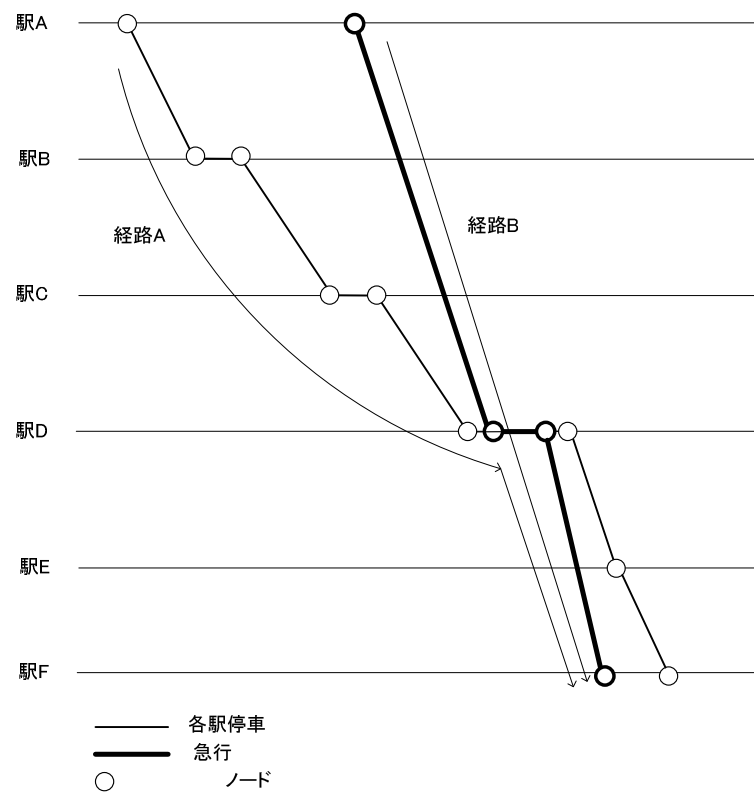


図 3.7 同着で先発経路が除去される例

第4章

異常時における乗客流推定

前章では、乗客行動をグラフ理論により表現し、最短経路探索を用いて乗客の経路を決定するプロセスについて述べた。このことによって、事前に定められている運行計画において、乗客の出発駅と目的地の組み合わせである OD(Origin-Destination)が与えられれば、どのように乗客が列車をのりついでいくかという予測をすることができるようになる。しかし、この手法を用いた先行研究による乗客流推定は、さまざまな問題が存在する。問題点と、その解決に必要な新しいルールを導入について述べる。

4.1 既存の乗客流推定法に存在する問題点

運行計画時における正常時の乗客流推定と異なり、ダイヤが乱れ運転整理が必要になったときの異常時には、ダイクストラ法を用いた最短経路探索によって乗客の経路を決定する際には、次の機能が必要となる。

- ①積み残しを考慮できること
- ②乗客の乗降に伴って生じる増延を考慮できること
- ③代替交通機関が考慮できること
- ④乗客が事故を予見した行動をとらないよう状況の変化と意思決定の因果律を正しく表現できること

以下、それぞれの問題点を述べる。そのうち本研究では、④の機能を実装することを目的とし、4.2 節以降で述べていく。

4.1.1 積み残し

積み残しとは、乗客が列車に乗り切れずにホームに残ってしまうことを指す。これは正常時でもおこりうることであるが、異常時にはさらにおこりやすい。通勤列車においては一般的には定員の 2.5～3 倍である混雑率が 250～300%における状態が限界であると考えられる。それ以上の乗客が乗車したいという状況の場合は積み残しを考えなくてはならない。

先行研究においては、混雑率は生成されたダイヤの評価値として導入されている。これによって、混雑が激しい列車に対する評価値は著しく悪化するように設定されており、それによってある程度の混雑の発生を防ぐような設計がなされている。しかし、積み残し自体は考慮されておらず駅にいる乗客は乗るべき列車が来たときに全員乗車する仕様になっている。正常時においてはそこまで考慮する必要が少ないが、特に異常時における乗客流推定プログラムを作成するにあたっては、乗客集中が起こりやすいために積み残しを反映できるようにすることが望ましい。

モデル化をするにおける課題は、積み残される乗客をどのように判定するかということや、積み残された乗客が再度どのような行動を取るかということの設計が必要になるということである。積み残される人数は、駅での列車待ち人員から乗車可能な人員を引けば求めることができるが、乗客流推定を行うためには、乗客の OD 分布を正確に把握しておく必要がある。例えば、乗車待ちをしている人のうち、各目的地別にある列車に乗れる人をランダムに抽出するという方法がある。しかし、これには再現性がないため、運転整理案の定量的な評価をしたいという目的にはそぐわない。これを解決するためには、目的地別に乗客を比例配分するなどの方法が考えられる。

4.1.2 乗降に伴う増延

増延とは、乗客の乗降にかかる時間が想定されているものよりも多くなることで出発に時間がかかり、列車が遅延することをさす。通常数の乗客の乗降であれば、運行計画ダイヤで各駅に設定された標準停車時間内での乗降が可能であるが、標準停車時間内に乗降が可能な人数以上の乗降が発生した場合、発車時刻が運行計画のものよりも遅れる。この遅延は他の列車に波及することも考えられ、生じた遅延は運転整理案ダイヤにフィードバックする必要がある。このような増延は、運行計画時には OD が毎日ほぼ一定であるため生じる可能性は低い、異常時には列車の詰まりや、駅に乗客が大量に滞留してしまうことが起こるため、特に事前に予測して対処する必要がある。

プログラムにおいて増延の処理を行うためには、乗客流推定が不可欠である。乗客の数を推定しなければどこで増延が発生するかも予測することはできない。実際には、駅における乗降時間を乗降客数から求めるような関数を作成すればよい。それによって求められた時間が、標準停車時分よりも多くなっていれば、その列車で増延が発生することになる。ここで、増延によって停車時間が増えることでさらに乗降時間が増えることが考えられる。一定の閾値より下においては増延が微少であるとして無視するか、もしくは増延によって生じた停車時間中に来る乗客を考慮に入れた増延の関数の戻り値を設定すればよい。一定の割合のマージンを加えれば現実的に処理できると考えられる。

そして、そのような増延の処理を行った後に図 4.1 のような問題が生じることがあり

うることは留意しなければならない。この図は複々線におけるダイヤであり、図 4.1(a) が計画ダイヤである。このとき、増延によって駅 A で列車 a が遅延した場合、図 4.1(b) のようになったとすると、列車 a が別路線を用いて運転している列車 b と接続する。これにより、いままで不可能だった乗換が可能になり、新たな乗換リンクが発生する。このような事態になった場合、新しい乗客行動経路が発生するため、経路選択においてこの状況が正しく反映されるように配慮しなくてはならない。

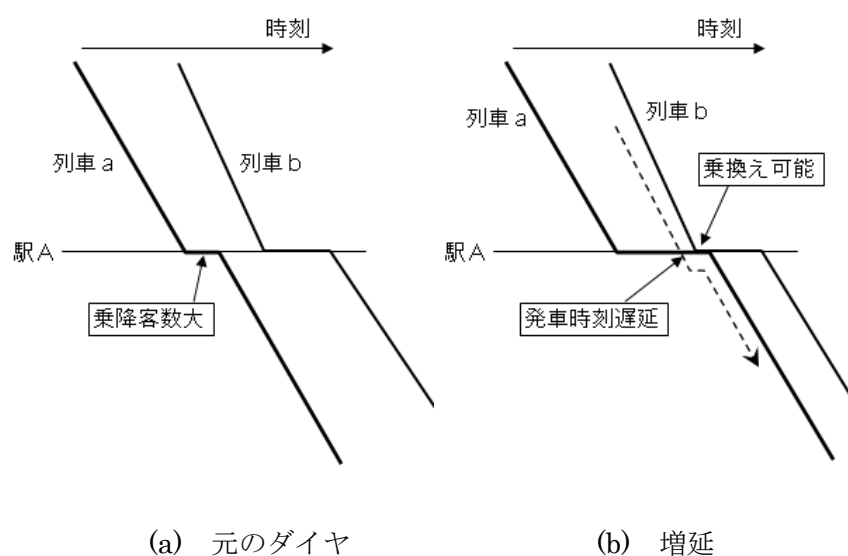


図 4.1 複々線における増延を行なうことによる問題例

4.1.3 代替交通機関の使用

異常時においては、目的地にたどり着くために初期に乗車していた鉄道会社以外の交通機関を使って移動することがありうる。それは同じ鉄道であることもあるし、バスなどの他の交通機関であることもある。全乗客の代替交通機関を考慮することは不可能に近いが、大多数の乗客が利用するであろう代表的な代替交通機関を考慮することが実務上重要である。

4.1.4 事故を予見した経路選択

先行研究の手法は、運転計画の変更と乗客の意思決定の動的な変化の間に存在する因果律を考慮していないため、乗客が将来の事故を予見した上で経路選択を行ってしまう。

例を図 4.2 と図 4.3 を用いて説明する。図 4.2 を、平常時の運行計画ダイヤとする。普通と急行の列車が存在するが、駅 A から駅 C に向かいたい乗客にとって、到着までの時間を考えると普通よりも急行に乗車したほうが早くたどり着くことができる。そのため、時刻 0 から p に発生した乗客は、先発の普通に乗車せず、後発の急行に乗車する。これは、設定したルールからしても、現実的に即して考えても、妥当な選択行動である。

ここで、事故で急行列車が駅 A と B の間で長時間停止することになってしまったとする。そのときのダイヤが図 4.3 である。このとき、待避変更という運転整理が行われており、駅 B で急行が普通を追い抜くという状況が解消されている。それによって、駅 C に先着する列車が、急行ではなく普通に変わってしまっているというのが、従来の正常時のダイヤとの違いである。この場合に前と同じ条件で駅 A から駅 C に向かいたいと考える乗客を、現実的に即して考えると、駅 A で急行の列車に乗車した後に事故に遭遇し、遅れた列車にのって駅 C に到着する、となる。しかし、先行研究の乗客流推定アルゴリズムでは、事故によってずれてしまったダイヤグラム全体に対して最短経路を行ってしまう。そうすると、時刻 p までに発生した乗客は駅 A から駅 C に向かうために、先行する普通の列車を選択してしまう。ダイヤグラム全体を見たときに、これが最短経路だからである。

平常時の運行計画が初期条件として存在し、事故が起こることによって突然運行計画が変更され、変更されたダイヤが明らかになったあとに、現実的に即して移動可能な範囲で経路の再選択行動を取る、という動的意志決定の因果律を正しく記述できる必要がある。このような正しい論理関係を満たした乗客流推定を以下で記述する。

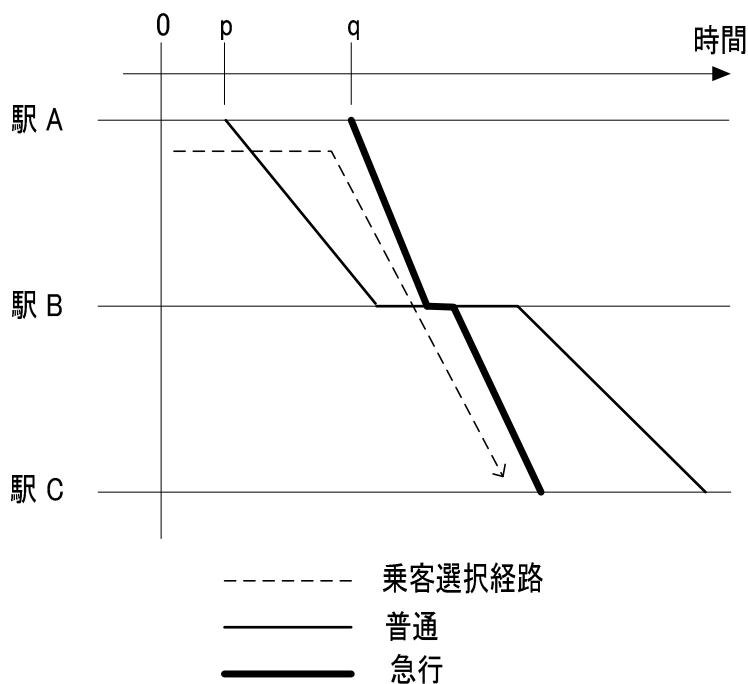


図 4.2 計画ダイヤ時の乗客行動

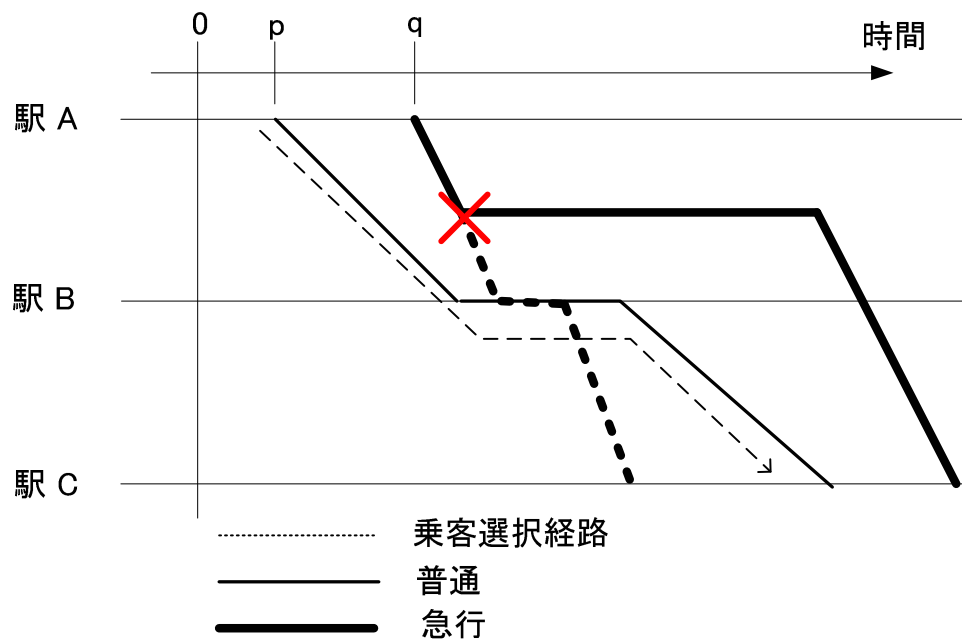


図 4.3 事故予見をする乗客行動

4.2 事故予見をしない乗客流推定法

本節では、事故を予見して乗客が経路選択を行う問題点を回避するために、現在使用しているプログラムにどのような改良を加えればよいのかについて述べる。

4.2.1 事故前後における情報の処理

乗客にとって事故発生を知ることができるのは、当然ながら事故発生後である。事故が発生する前において、正しい乗客行動を考えた場合、事故の発生を知らない上で経路選択を行う。このとき乗客は平常ダイヤが続くものと仮定して行動しており、事故が起こりダイヤに変更が加えられた場合、改めてその情報を入手して次の経路選択決定行動を行う。ただし、事故発生時点で列車に乗車している乗客は、次の降車可能駅にたどりつくまでは、意思決定をしても、他列車に移動する手段がないことに留意する必要がある。

以上は、事故前に駅に発生し、事故前に乗車を開始した乗客の場合である。事故時には駅に発生していたが、乗車行動を一度もしていない乗客は、事故時を境にして、新しいダイヤグラムに対して経路選択を行うようにすればよい。一度の経路選択変化が発生するが、実質的に乗車行動を行っていないため、乗車行動とすれば一回として数えることができる。

事故後に駅に訪れた乗客に対しては、事故後のダイヤを与えて判断を行えばいいため、そのようなダイヤを与えることができれば、一度の経路選択行動を行えば十分である。

4.2.2 乗客行動を決定するタイミング

事故が起こり、ダイヤグラムに変更が加えられ、乗客の経路選択が変化するという順序を正しく再現しなければならないということはいままで述べたとおりであるが、正しい順序を保つこと以外にも、決定しなければならないことがある。それは、それらの出来事が起こる間に必要な時間がどれほどのものであるかということである。

まず、事故が発生した場合に、事故の存在が周知され、運転整理が完了するまでにどれだけの時間がかかるかということを検討しなければならない。運転整理は、最初にも述べたように、現在は人手で行われており、瞬時に完了するものではない。よって、事故の発生時に、まず、ダイヤグラム全体が変わる機会が発生する。そして、個々の運転整理案を

適用する際にも同様のダイアグラム全体が変わる機会がある。運転整理の規模によっては、時間をおって運転整理が進み、刻一刻とダイヤが複数回にわたって変化する。

次に、事故後にどのような経路選択を取り直すかというのは、事故後にどのような情報が乗客らに提供されるかという点を考えなければならない。ダイアグラムが変更されたことを知らない乗客は当初の選択経路通りに乗車し続け、そうでない乗客は、事故を知った時点で変更の可能性を検討する。ダイアグラムの変更を瞬時に知ることができるかどうかというのは、情報伝達技術や仕組み次第である。いつ情報を受信できるかは、個々の乗客によっても違うものであるが、今回のモデル化では、すべての乗客が同じタイミングで情報を受信できるものとする。

最後に、事故原因の復旧であるが、実際には事故原因がいつ復旧するかを正確に予測するのは難しい。未来を予測してそれをもとに運転整理を行うが、現実には予測がずれることでさらなる運転整理が必要になることもある。なので、運転整理が完了するまでの間に、事故原因が復旧するというタイミングが入ることになる。

以上に述べたような、乗客行動選択の変化もふまえた様子を図 4.4 に示す。

モデル化の手法はさまざまなものが考えられるが、プログラムの実装としては汎用性、拡張性が高いものを採用する。本研究では、このようなモデルを想定した上で、プログラム上の処理を簡単にするために事故発生の時刻と、運転整理手法の適用する時刻が同一でありその情報は瞬時に伝わり、事故原因の復旧時間は当初予測されたものでおさまるものとする。すなわち、図 4.4 において

- $n_x = 0$
- X_1 は時刻 0 の時点で判明している
- $X_2 = 0$

という発生時間及び発生順序になっているという仮定をおく。すなわち、事故発生後瞬時に運転整理は完了し、事故原因の復旧時間は判明しているとする。そしてその後、瞬時に乗客への情報伝達が行われる。これらの出来事の間の時間は 0 であると仮定する。それらをイメージした図を図 4.5 に示す。

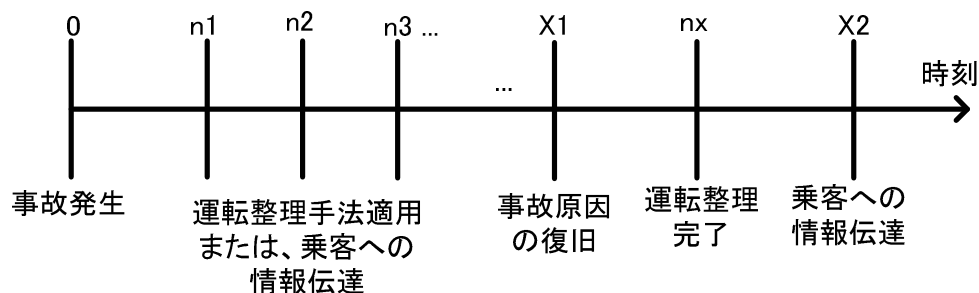


図 4.4 事故後における各イベントの発生順序と時刻

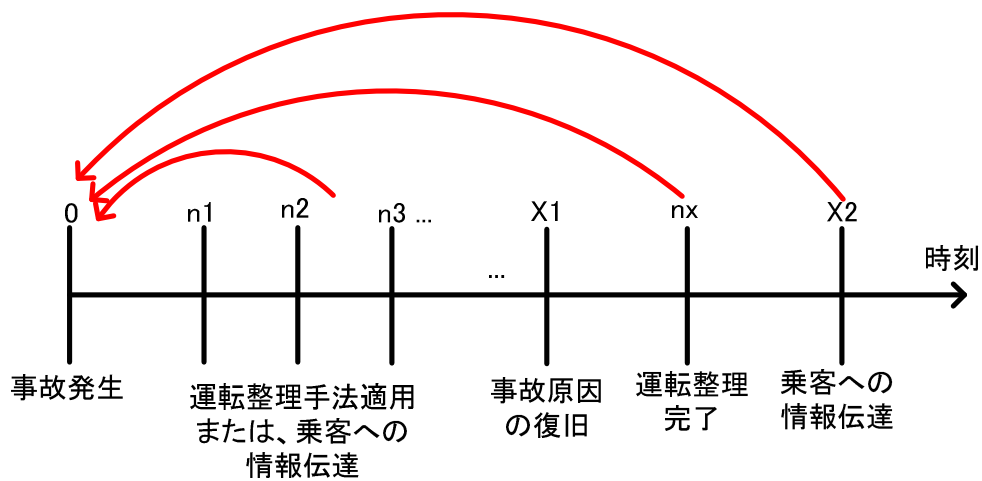


図 4.5 本研究におけるイベント発生時刻の扱い

4.3 実装するアルゴリズムの概略

前述した乗客流を表現するための 2 つのクラスを主に操作することで、目的である、事故予見をしないプログラムを作成する。従来の列車運行グラフからの乗客行動グラフは図 4.6 のようなアルゴリズムで生成されていた。しかしこの方法では事故予見をするグラフが作成されてしまう。ここで、ダイアグラムの起点となる時刻を $t=0$ 、前節で述べた図 4.5 における事故発生時間を $t=a$ としたときに、図 4.7 に示したように、

- ・時刻 $t=0$ における乗客グラフに後の処理に必要なデータを加えたグラフ
- ・時刻 $t=a$ における事故を予見する乗客グラフ
- ・時刻 $t=a$ における事故を予見しない正常な乗客グラフ

の 3 つの乗客グラフに対して操作を行うことで事故を予見しないグラフを作成する。ここに、それぞれに対してアルゴリズムを記述する。ただし、 $t=a$ における事故を予見する乗客グラフは、乗客の配分まで行う必要がなく、中身が空であるノードとリンクの構造のみをコピーすればよい。事故を予見しない正常な乗客グラフ作成アルゴリズムの説明の中に含める。

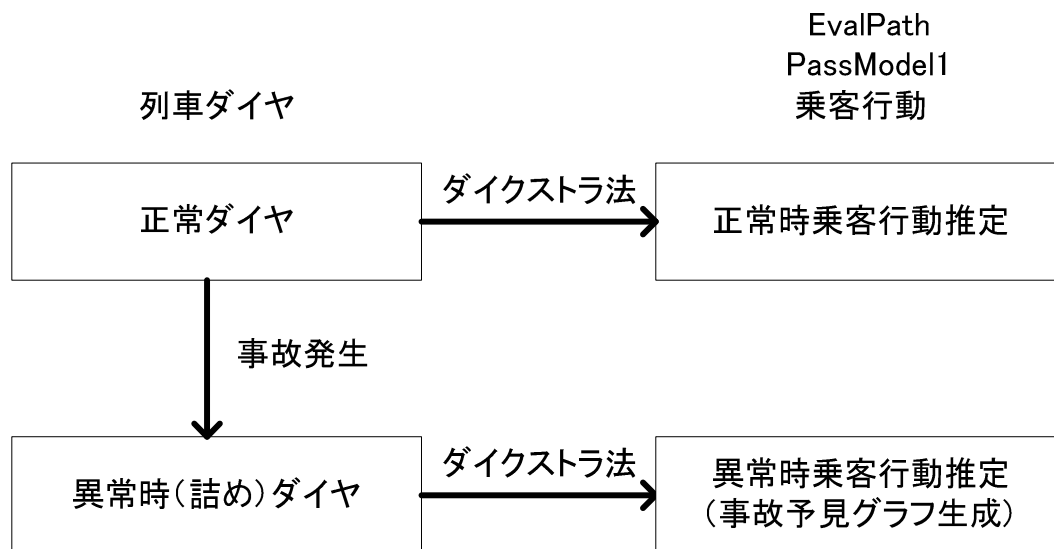


図 4.6 従来の列車運行グラフからの乗客行動グラフ生成法

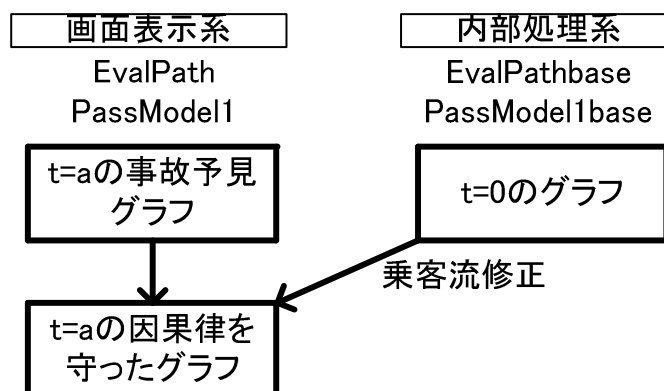


図 4.7 事故予見をしない乗客行動グラフ修正法

4.3.1 従来の乗客流動推定法

今回導入するアルゴリズムを記述する前に、比較のために従来の乗客流推定過程を記述する。従来の乗客流推定アルゴリズムを図 4.8 に示す。

まず、経路クラスの初期化と代入が行われ、並行して事故によって遅延した状態が反映されている列車グラフ構造から乗客グラフのノードやリンクが作成される。この時点

では、乗換リンクや乗車リンクという空箱が用意され、その中に乗車する人数などは記載されていない。ノードのイベントが発生する時刻は、列車グラフからのコピーで行われているため、事故後のものを反映したものになっている。

次に、乗客グラフのイベント発生時刻データを利用して、すべての乗客グラフの発ノードから最短経路探索を行う。これによって、任意の駅の任意の時刻に発生した乗客が、目的地によってどのような経路を選ぶのかという情報が一律に記録される。そして、経路クラスに重複する経路や実質不必要な経路が含まれることがあるため、それを整理する。

最後に、作成した経路クラスから OD 表を用いて実際の乗客を配分する。乗客グラフにおいてノードとリンクに値が代入される。その後、損失値の三要素である、乗車時間による、乗換損失、混雑による損失を加えることで損失値全体を求め、結果を画面に表示する。

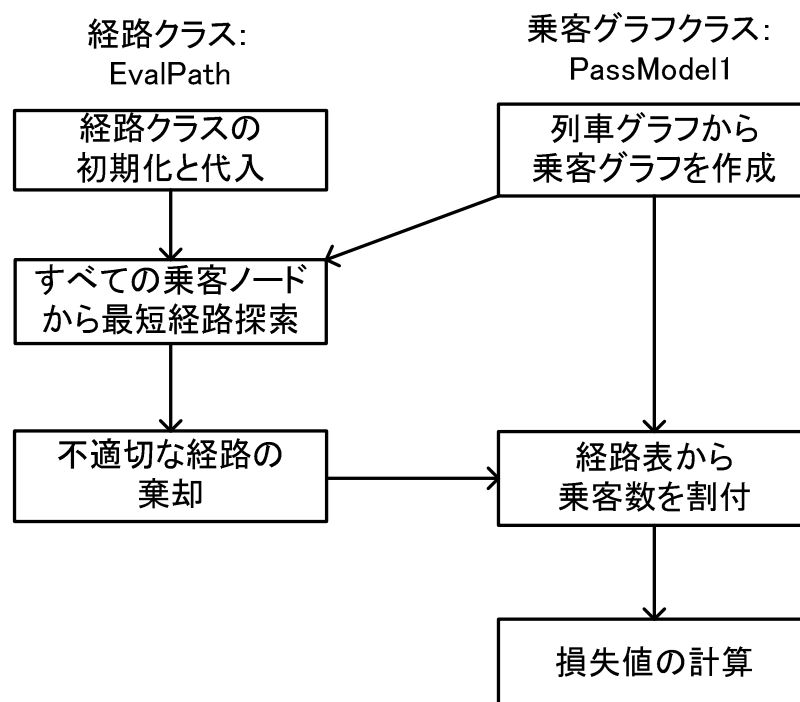


図 4.8 従来の乗客流推定法

4.3.2 時刻 $t=0$ における乗客グラフに後の処理に必要なデータを加えたグラフ

今回導入する新しいアルゴリズムは、新しい点としてデータを保持するクラスが新設されている点がある。その上で、時刻 $t=0$ における列車グラフから、経路表から乗客数を割

付するところまで、前節と同様な動作を行う。

次に、事故時の駅にいる乗客のデータを採取する。これは、何人の乗客がいたかというだけでなく、それぞれの乗客がどの駅に向かいたいのかという OD 情報も含めて保存する必要がある。経路別の人数を保持する必要があるため、乗客グラフクラスよりも経路クラスに保存させたほうがデータの管理上容易である。そして、事故が未知なノードに対してフラグを立てる必要がある。事故が未知なノードとは、乗客が事故発生時点で事故の発生を知らないか、知っていても乗換や降車などの選択行動が取れない状態であるノードを示す。詳しくは後述する。最後に損失値を計算する。これらの動作のフローチャートを図 4.9 に示す。

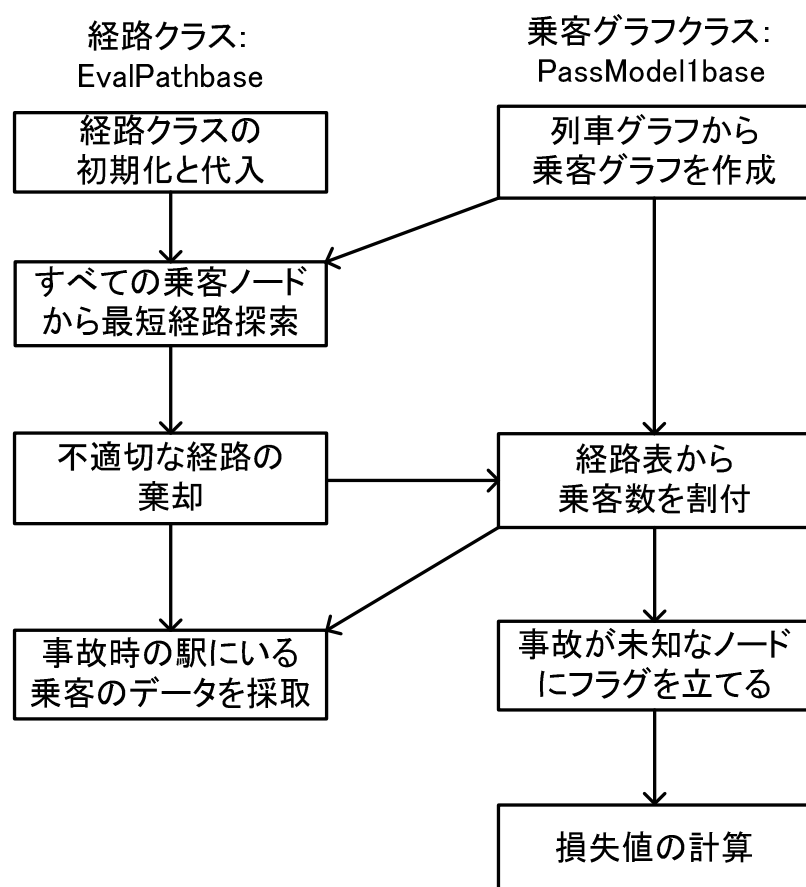


図 4.9 $t=0$ のグラフから事故後の修正に必要なデータを取り出すフローチャート

4.3.3 事故発生時間における事故を予見しない正常な乗客グラフ

事故発生時間である時刻 $t=a$ における、事故を予見しない正常な乗客流推定グラフの作成方法についてここで述べる。

最初に、いままでと同様に、経路クラスの初期化と乗客グラフのノードとリンク作成を行う。ただし、元になる列車グラフは時刻 $t=a$ における事故によって状況が変化した後のグラフである。これによって、乗客グラフの各ノードやリンクの発生時刻は、事故後の変化したものになる。この時点では乗客数などの値は定まっていない。

次に、前節で予め用意しておいた、フラグが立っている事故が未知なノードを利用し、そのようなノードに対してフラグを立てる。そして、ダイクストラ法による最短経路探索と、不適切な経路の棄却作業を行う。このとき、最短経路探索は、事故後の発ノードからのみ行うことが今回のアルゴリズムにおける重要な点である。事故前における乗客の意志決定と、事故後における乗客の意思決定を分離する必要がある。

そして、同様にフラグを利用して、空の乗客グラフの事故前にあたるノードとリンクに、時刻 $t=0$ で事前に採取しておいたノードとリンクの人数をコピーする。事故前のノードとリンクにおける人数は、当然ながら事故前も事故後も変化しない。

その後、事故時に駅にいる乗客の人数を、経路クラスにのせる。事故時に駅にいる乗客は、 $t=0$ の経路クラスの予備作成時に保持してあるものを利用する。このような作業を行わなければいけない理由は、本プログラムが、駅に発生する乗客を、OD ごとに前の列車との間隔で求めているからである。目的地別に乗客を考えて計算しているため、ダイヤ上の前列車との間隔とこれは一致しない。これを正しく求めるためにはダイヤ全体の最短経路探索を行い、経路クラスをすべての時間に対して求めなければ正しく求めることができない。しかし、今回の手法では、事故後に関してのみ経路表を作成しているため、事故前後の部分のつなぎをうまく作ることができない。よって、事前に事故時における OD 別の乗客人数を確保した上で、この段階において、現存している経路表にのせる。そして、事故前に列車に乗車しており、事故後に降車するチャンスがあり、新しく経路を取り直すことができる乗客に対しても、同様に新しい事故後の経路のうちどれに乗車するかを選択する。

最後に損失値を計算する。損失値においても、従来と違う方法が必要である。従来は、駅における待ち時間を、同一 OD の前の列車との間隔によって計算していたが、事故の前後でその値を保持することができなくなっている。事故前のものと事故後のものに分離し、損失値を求める。

これらの全体の流れを図 4.10 に示す。

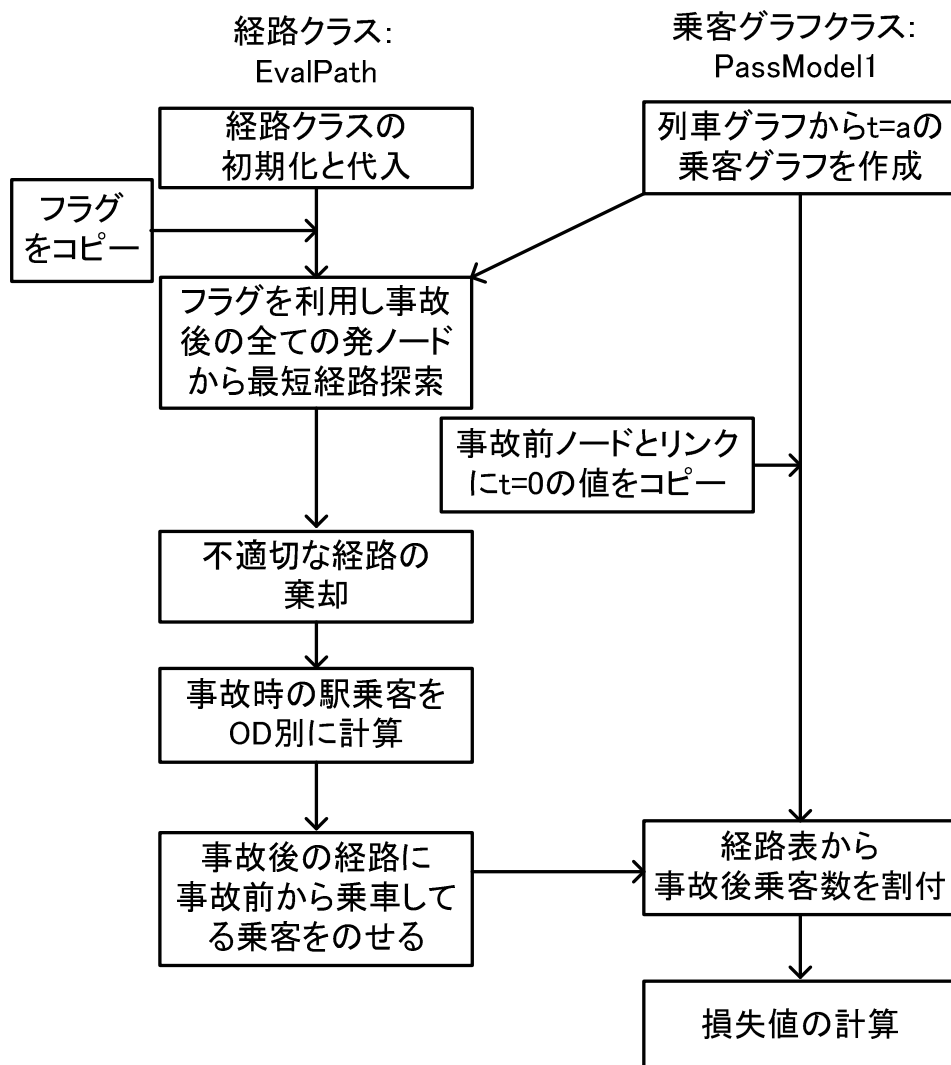


図 4.10 事故時における正しい乗客グラフの生成法

4.4 各機能要素のアルゴリズムの詳細

この節では、前節で説明したアルゴリズム中で実際にどのようにグラフを操作しているのかを示す。

4.4.1 事故前後を区別するグラフの定義方法

ここでは、事故前後におけるフラグをどのように立てるかについて記述する。ノードを分離し、フラグを立てる様子を図 4.11 に示す。

事故発生を知らないか乗換の選択余地のない乗客がいるノードを抽出する。対象となるのは、事故前のすべてのノードと、事故時に走行している列車の事故後における第1番目の着ノードである。それらのノードは、図 4.11 の黒で塗った部分に該当する。さらに、それらのノードの中で、各列車における到着時刻が一番遅いノードを、末端ノードとして別途記録する。これらのノードは図の中で、黒丸にさらに白丸で覆われているノードである。これらのノードを分ける必要があるのは、末端ノードにいる乗客は、乗車経路の再決定を行わなければならないからであり、そのためには乗客数だけでなく、OD別にわけた乗客数の情報が必要だからである。それ以外のノードとリンクに関しては、その駅で乗降した乗客数や、駅間を移動した乗客数の数だけがわかればよいが、例外があるためそれは後の節で処理を行う。

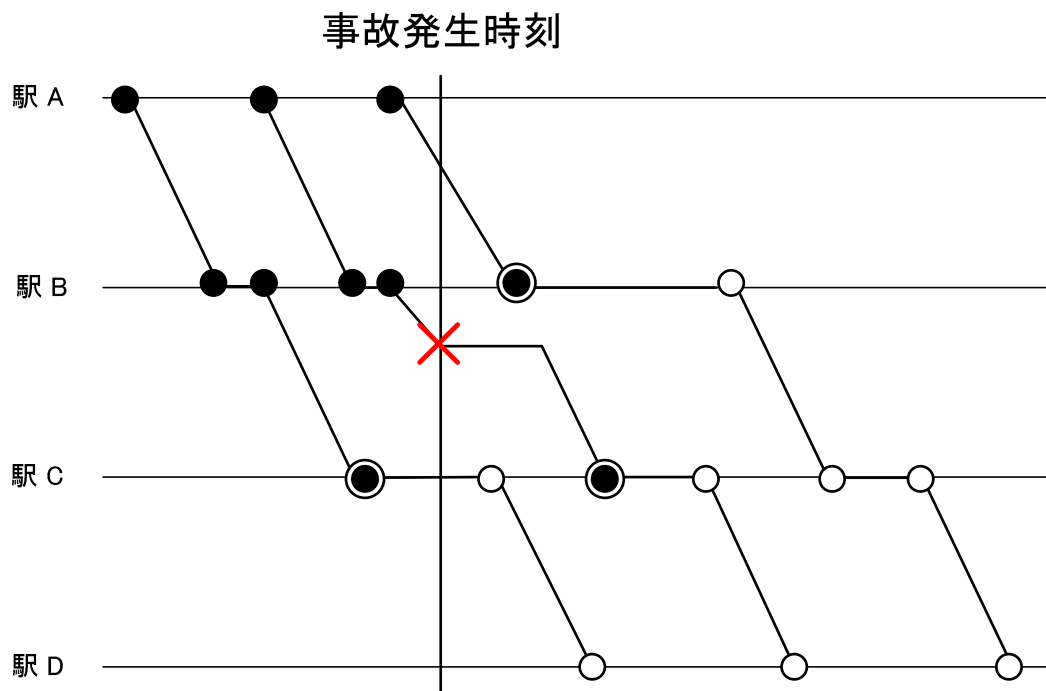


図 4.11 事故前後におけるノードの分離

4.4.2 事故時に駅にいる乗客数の把握方法

事故後から、ダイクストラ法による最短経路探索を行いなおすため、事故時に駅に存在する乗客の数が必要である。当然、OD別の情報が必要となる。また、それぞれのODに対して、駅に滞留していた平均時間の情報も保持しなくてはならない。その情報は、後にダイヤの評価値を求める時点で、乗客の損失時間を求めるために必要となる。

図 4.12 のような状況で、点 A に示す、事故発生時における駅 A にいる乗客の数を数えたいとする。このとき、時刻 $t=0$ で作成した経路クラスには、ダイクストラ法による最短経路探索により、次のような経路表が作成されているはずである。

- ・ 駅 A から B への OD : 1M もしくは 5M に乗車
- ・ 駅 A から C への OD : 1M、3M、5M もしくは 7M に乗車
- ・ 駅 A から D への OD : 3M もしくは 7M に乗車

このとき、OD 別に乗客が駅に滞留することになるので、前列車との間隔を考えて、点 A における OD 別の駅滞留乗客は次のようになる。

- ・ 駅 A から B への OD : $x - a$ 時間に発生する乗客
- ・ 駅 A から C への OD : $x - b$ 時間に発生する乗客
- ・ 駅 A から D への OD : $x - b$ 時間に発生する乗客

時間さえわかれば、本プログラムでは一様に乗客が発生するものと見なしているため、OD 需要表から、駅にいる乗客数が OD ごとにわかる。このとき、損失値の計算のため、求めた時間の記録も同時に行う。

点 C のように、事故発生時点で発車している列車が存在しないものに対しては、先行研究プログラムにおいて、周期という概念があるため、それを利用して駅にいる乗客を計算する。周期を y とし、それは図 4.11 に示すダイヤが示す範囲の時刻より十分幅が広いものとする。このとき、時刻 $t=0$ で作成した経路クラスには、ダイクストラ法による最短経路探索により、次のような経路表が作成されているはずである。

- ・ 駅 C から D への OD : 1M、3M、5M もしくは 7M に乗車

先行研究から実装されている周期の概念により、本プログラムでは、 $0 \sim y$ の時間に及ぶダイヤが無限に繰り返されているうちの一部を切り抜いたものが、今扱っているグラフであるという認識をする。よって、駅 C においては、前の周期の 5M に該当する

ものに間に合わなかった乗客が、駅に残っているものとして扱われる。よって、前周期の時間にして $y - c$ に相当する時間に加え、このダイヤの周期の事故発生時までの時間を計測する必要があり、点 C における OD 別の駅滞留乗客は次のようになる

- ・ 駅 C から D への OD : $(y - c) + x$ 時間に発生する乗客

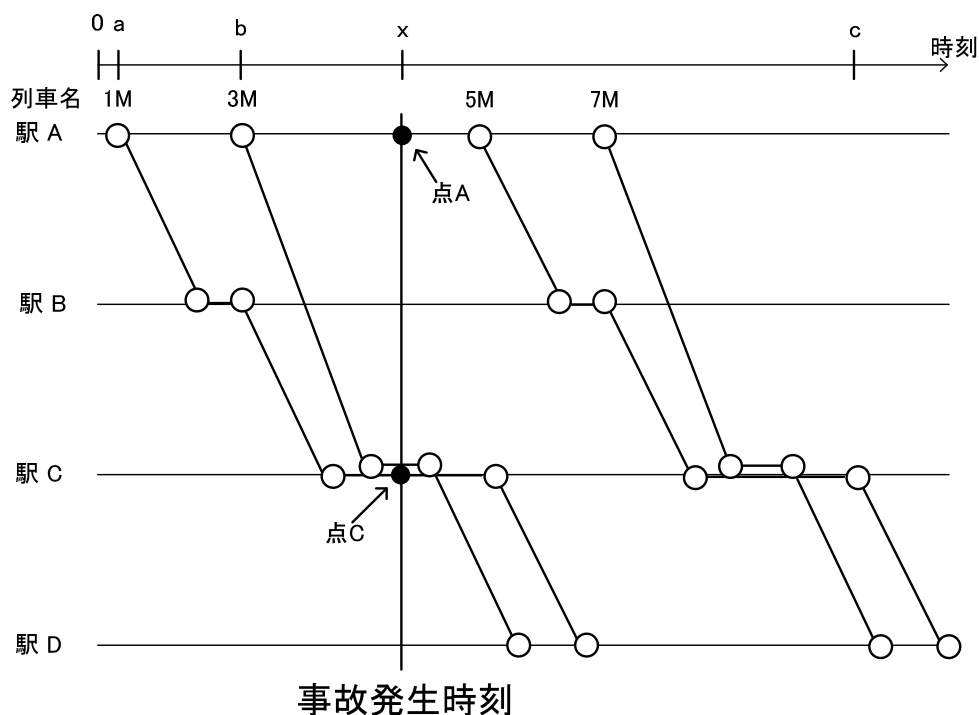


図 4.12 事故時の駅にいる乗客数の取得

4.4.3 事故後の経路に事故前から乗車している乗客の分配方法

事故前の末端ノードがつけられたノードや、事故前のノードから出ている乗換リンクに乗車していた乗客を、新しい事故後の経路に分配する必要がある。図 4.11 における末端ノードが事故前か事故後かで扱いが変わる。

(1) 末端ノードが事故前の場合

事故前末端ノードに残っている経路を一つずつ検索し、事故後における同一経路のうち、一番発生時間が早いものに付け足す。経路データ上では、乗客は新たに末端ノードが所属していた駅にいるものとして数える。その様子を図 4.13 に示す。

事故後の新しい移転先経路を見つけることができたなら、着ノードである末端ノードと、新経路の発ノードの間の運行リンクもしくは乗換リンクに、対象 OD の乗客を移転する。この作業によって事故前後における乗客の移動を正しく表現することができる。

(2) 末端ノードが事故後の場合

末端ノードの発生時刻が事故後である場合は、乗客が改めて経路の再選択を行うことができる時刻が末端ノードの発生時刻であることが(1)の場合と違う。(1)では、事故発生時刻において再選択を行うことができる。

従って、経路再選択手法は(1)と同様でよいが、事故時間を起点にして事故時間に一番近い経路を探索するのではなく、末端ノードの発生時刻を起点にして、ノードの発生時刻後で発生時間が最も近い経路を探す。その様子を図 4.14 に示す。

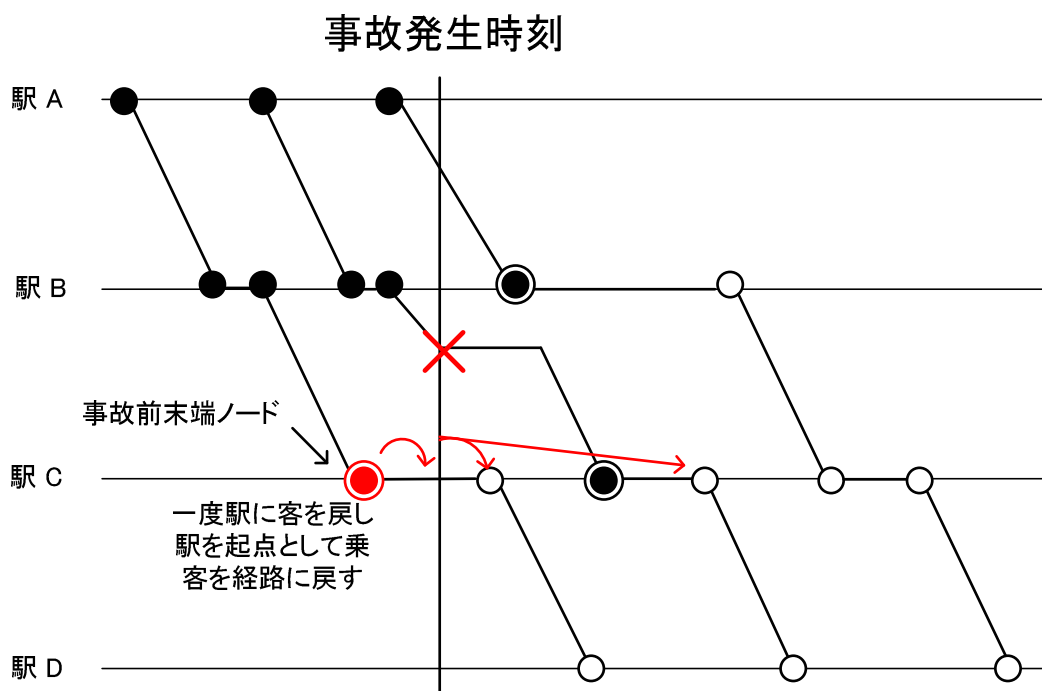


図 4.13 末端ノードが事故前の場合

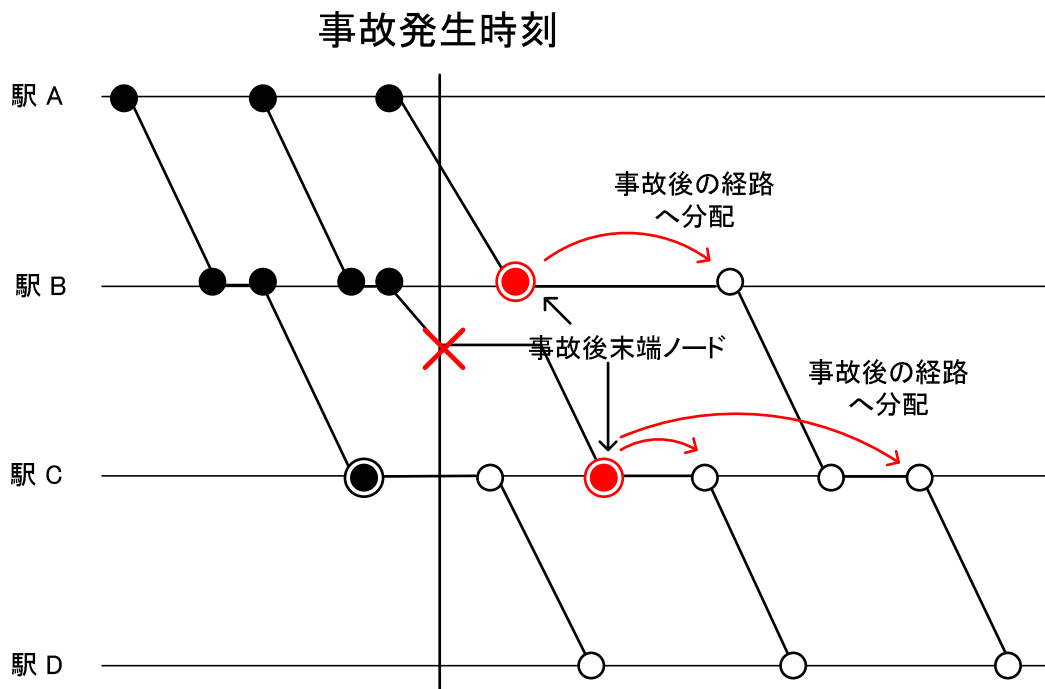


図 4.14 末端ノードが事故後の場合

以上で末端ノードに対する処理は終了するが、末端ノードではないノードであっても、乗客の再配分を行わなければならないケースが存在する。それを図 4.15 で説明する。図 4.15 では遅い普通列車と早い急行列車が走行しており、駅 B で普通から急行への乗り換えリンクがある。このとき、普通列車の駅 B 着ノードは 4.4.1 節で述べた末端ノードではないが、乗換リンクが事故発生時間と重なっている。事故発生と同時に乗客は情報を与えられ、新しく経路を選択することができるので、この乗換リンクに存在している乗客は経路を再度決定することができる。

この場合、駅 B 発から再度経路の割り振りを行うことができ、駅 B からの最短経路を選択する。このとき、事故前と事故後で乗換リンクが変わる可能性があり、その補填が必要となる。

この場合は、末端ノードの場合とは処理が違うので注意を要する必要がある。末端ノードからの乗客の再配分は、ノードの乗客全員に対して行われるが、この場合は乗換リンクにいる乗客にのみしか作用しない。また、イベントの発生時刻の扱いは末端ノードが事故前であったときと同じでよい。

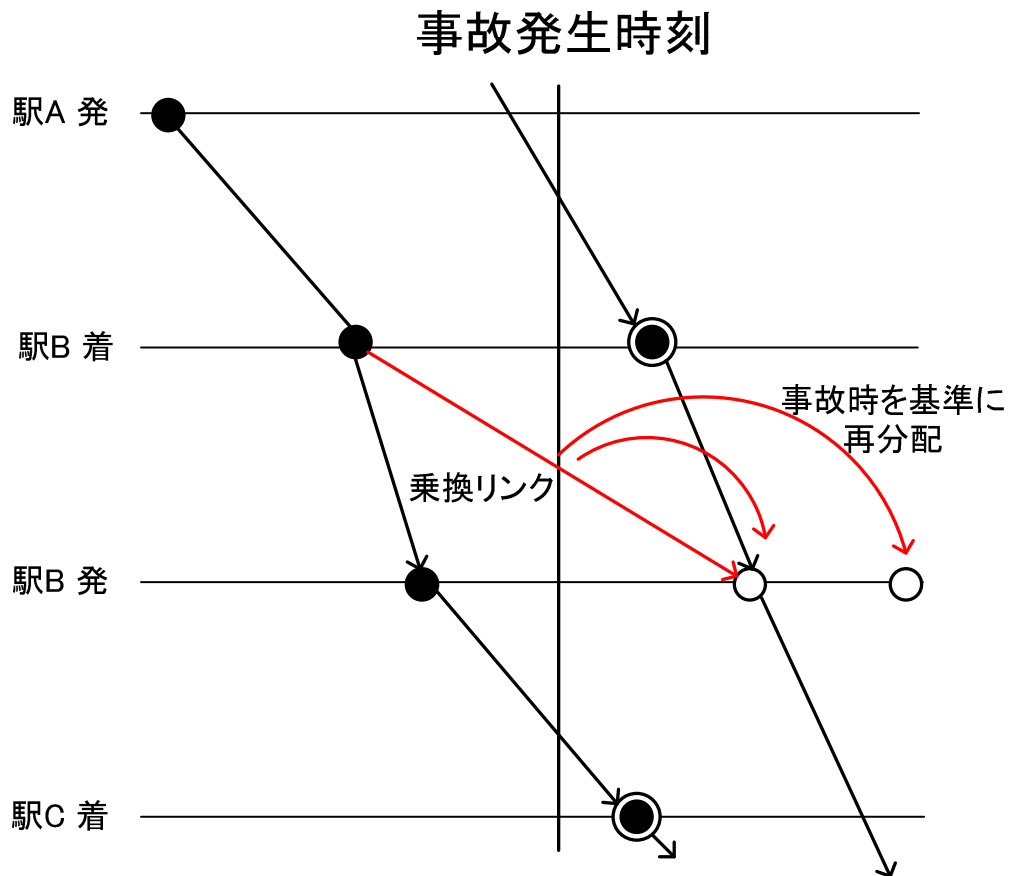


図 4.15 事故時間に乗換リンクが重なる例

4.5 提案手法の適用例と評価

4.5.1 ケーススタディーの目的と設定の考え方

いままでに述べた手法を実際に乗客流動シミュレーションシステムに実装し、評価を行う。ケーススタディーにケーススタディーび事故パターンは、事故を予見する場合としない場合で選択経路が変わるようなものが必要である。また、運転整理支援システムが都市近郊鉄道で特に必要とされているシステムであることを考慮し、都市近郊鉄道をモデルとしたダイヤグラムを利用することにする。それらを総合的に考慮し、

- ・ 末端駅同士、及び他の駅からも末端駅への需要が非常に大きい
- ・ 途中にも優等列車が停車する需要の大きな駅が存在する

- ・実装した事故を予見しないシステムの効果がわかりやすい範囲で単純なダイヤ

という性質を備えた路線の停車パターンが図 4. 16 であり、ダイヤ図が図 4. 17 である。停車パターンは普通が全駅停車で、急行が A, D, E, H, I, K 駅に止まるものとする。

ダイヤグラムは、2 本の普通列車と 1 本の急行列車の合計 3 本が一つのセットとなり、それが 4 回繰り返されているようなパターンダイヤである。画面表示上では、4 回繰り返しの 1 時間でダイヤが切れているが、プログラム上では周期の概念を持っているため、この 1 時間のダイヤが複数連なっている部分の一部を取ってきたものと考えてよい。

このようなダイヤは、都市近郊鉄道に見られるタイプであり、旅客需要である OD は末端駅間に多いものとする。

また、運転整理や乗客流動の計算の際には、A 駅から出発する方向のみを考慮対象とした。乗客出現モデルは 3. 2. 2 節で述べたモデル 1 を使用し、出発駅に均一に乗客が出現するモデルとする。ここで、

- (1) 平常ダイヤ時の乗客流解析
- (2) 運転整理後の、事故を予見する乗客流解析
- (3) 運転整理後の、事故を予見しない乗客流解析

の 3 パターンについて比較を行い、乗客流が正しく推定できているかどうかを調べ、それについて考察を行う。

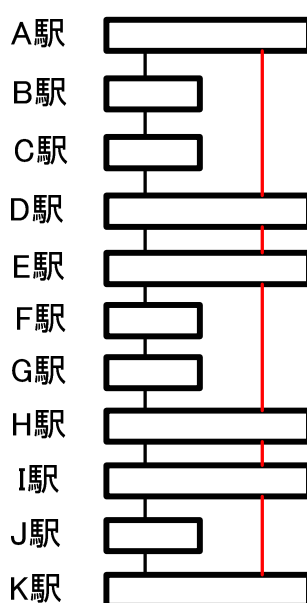


図 4.16 停車パターン(赤：急行 黒：普通)

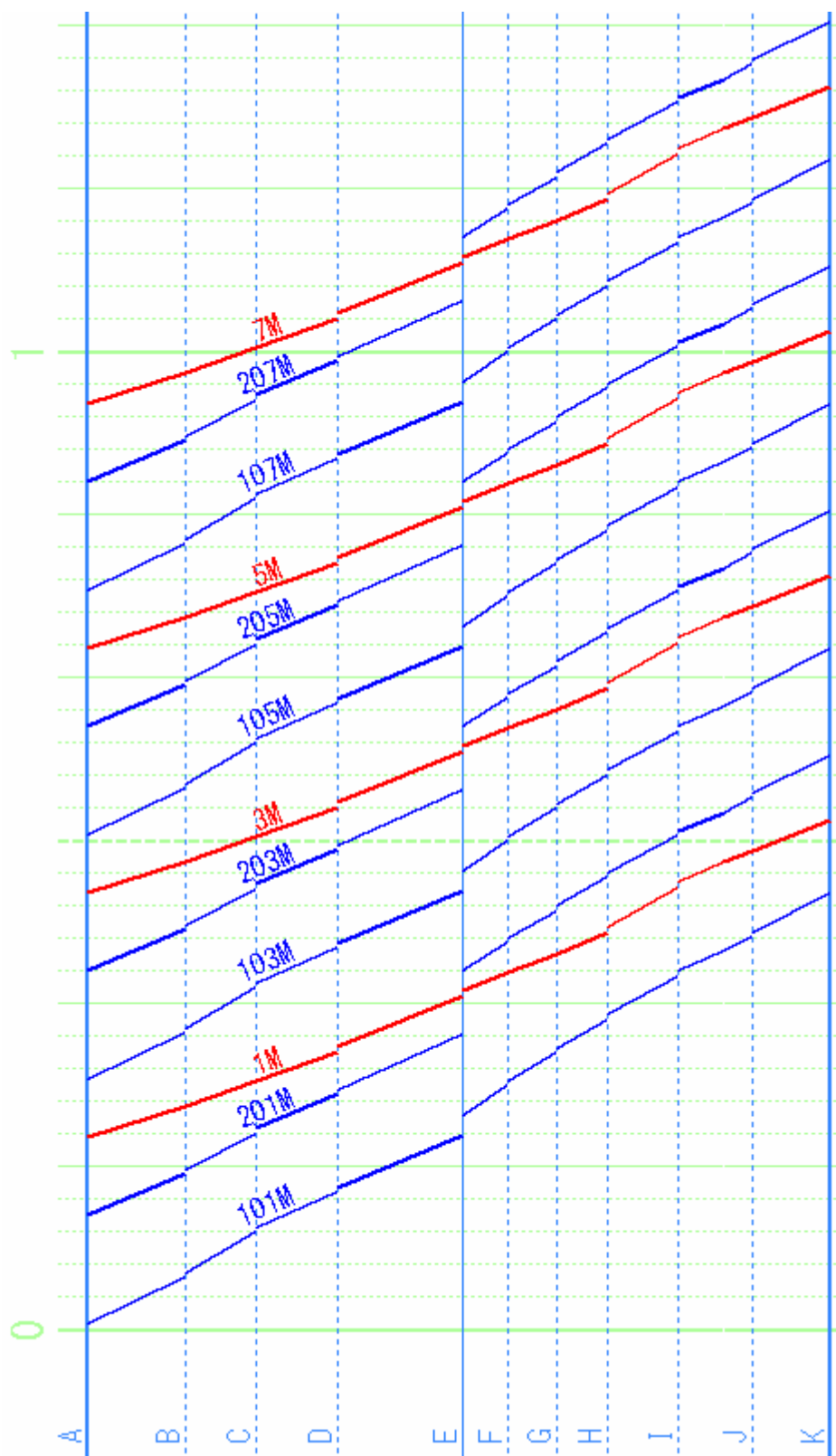


図 4.17 モデルとした路線のダイヤ

4.5.2 運行計画変化を正しく反映した乗客流推定

前節で述べた条件をもとに、実装した乗客流推定プログラムを実行する。

事故の概要を図 4.15 に示す。急行の 3M が、時刻 0 : 30 : 14 において駅 BC 間で 900 秒遅延したとする。このとき、待避変更の運転整理を行い、急行の 3M が普通の 203M と E 駅で順序が入れ替わる関係無くし、203M を先に走らせるようにしている。他の運転整理は実行していない。これにより、203M の乗客のうち 3M に E 駅で乗り換える予定だった乗客は選択の変更を強いられる。3M にのり駅 E で 203M に乗り換える予定だった乗客も同様である。

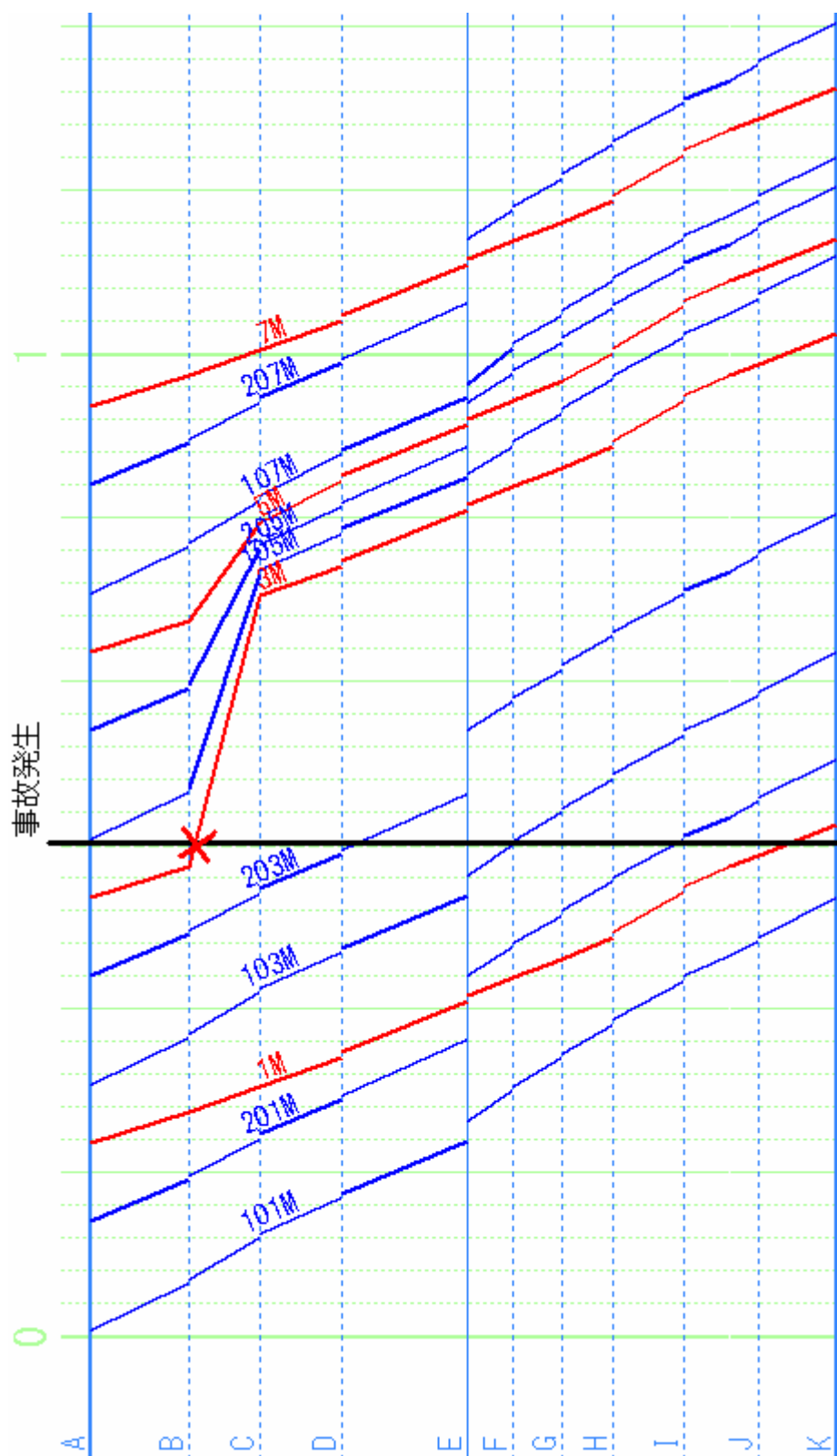


図 4.18 事故時の運転整理ダイヤ

このような条件下でケーススタディーを行った。図 4.19 に正常時の乗客流推定を示す。赤で囲まれた列車はそれぞれ、事故前及び事故に遭遇する予定の列車である。図 4.20 には事故を予見してしまう誤った乗客グラフを、図 4.21 には正しい乗客流推定を行ったグラフを示す。また、遅延した急行列車 3M と、その一つ前の普通列車 203M、及び事故後の詰まりが生じている普通列車の 105M、205M、及び急行列車の 5M について駅間ごとの乗客数を図 4.22 から 26 に示す。それぞれの縦棒は、左から正常ダイヤ、事故予見なしの今回実装した手法、事故予見をする従来の手法の順番で、正常時及びそれぞれの手法を使った時の乗客数を示す。

図 4.22 の事故列車 3M のグラフからは、事故予見が起きると乗客が大幅に減るという予想された結果が読み取れる。事故予見の可能な乗客流推定法を利用した場合、途中で遅延することがわかっている列車にのる乗客は大幅に少なくなる。それでも乗客がいるのは、後続の列車に追い抜かされることがないからである。また、事故予見がない場合、正常ダイヤ時よりも駅を進むごとに乗客が集中するという結果も妥当であろう。

図 4.23 の事故直前普通列車 203M のグラフからは、事故予見をして次の快速列車 3M が遅延してしまうことを予見し、3M を待たずに先に来た 203M に乗る様子がわかる。事故予見しない場合、事故後の E～J 駅において平常ダイヤよりも多くの乗客が乗る。これは事故後においては、後続の 3M 以降の列車がすべて遅延することを知っているという結果を反映した妥当なものになっている。

図 4.24～図 4.26 の事故後の 3 列車のグラフでは、事故予見の有無にかかわらず乗車人員が同じである。これは、事故後で列車が詰まってしまっていることと、乗換などの選択行動を事故予見してとれる駅がないことを考えれば妥当な結果である。ダイヤが詰まっているため、事故後の初普通列車の 105M には平常ダイヤ時よりも多くの乗客が乗車している。一方で、詰まったダイヤで急行、普通の乗客を一回ずつ処理した後の 205M 及び 5M は、正常ダイヤ時よりも列車間隔が短いために乗客が少なくなっている。

評価については図 4.27 に示す。正常時が最もよい評価、すなわち損失値が一番少ないのは当然であるが、事故予見がない場合の方が評価は悪化している。損失時間、乗換損失、混雑の三要素がすべて悪化している。事故を予見できた場合、急行の 3M に乗る予定であったら乗客が 203M に移ったため、この影響が大きいのだろう。203M は普通列車であるので、もとより平常時の混雑度も低く、負荷分散の意味で 203M への乗客の以降は混雑による不効用の値をよくする方向に働くと考えられる。損失時間に関しては、事故予見で早く到着可能な経路を選ぶようになるので予見なしよりもよくなるのは当然である。従来手法では評価の値もいい加減なものであったが、事故を予見しない正しい乗客流推定法を実装できたことで、評価も正しく行えることがわかった。

以上のケーススタディーから、乗客流動において事故の予見を回避するプログラムを実装することによって、以前の手法では明らかに正しくない乗客流推定を行っていた部分を、妥当性の高いものにすることができると示した。評価プログラムについても、正しく

乗客を割り当て、経路を配分しなおすことによって正確に求めることができる。

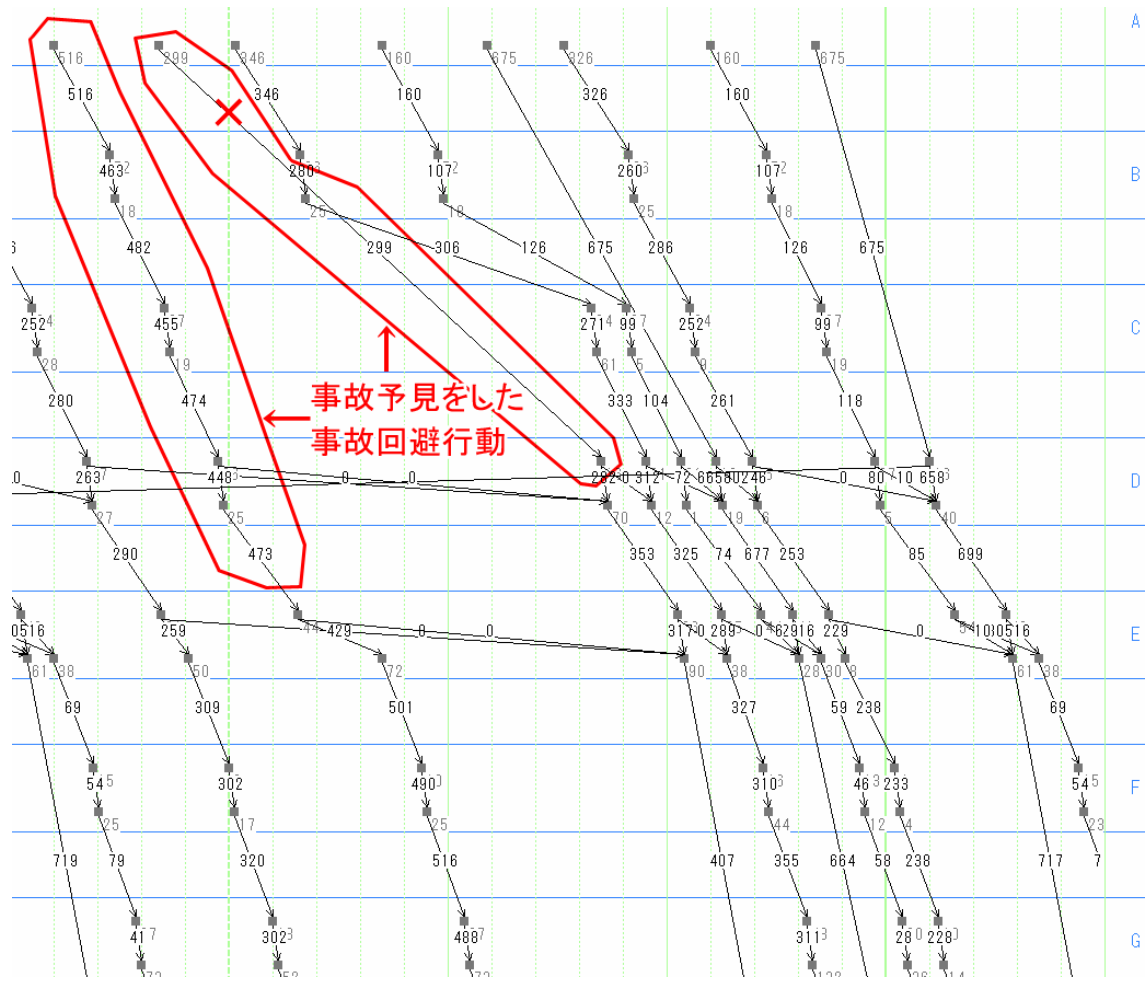


図 4.20 事故を予見した誤った乗客グラフ



図 4.21 正しい乗客流推定

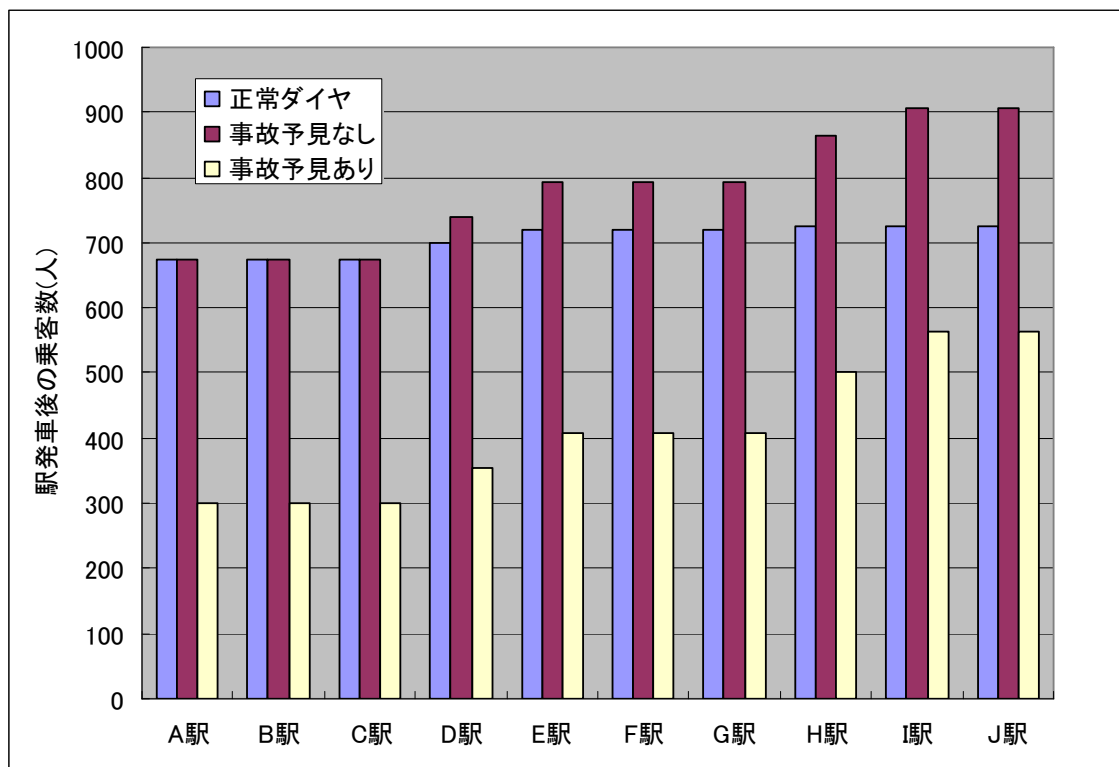


図 4.22 事故列車 (3M) の駅間乗客数

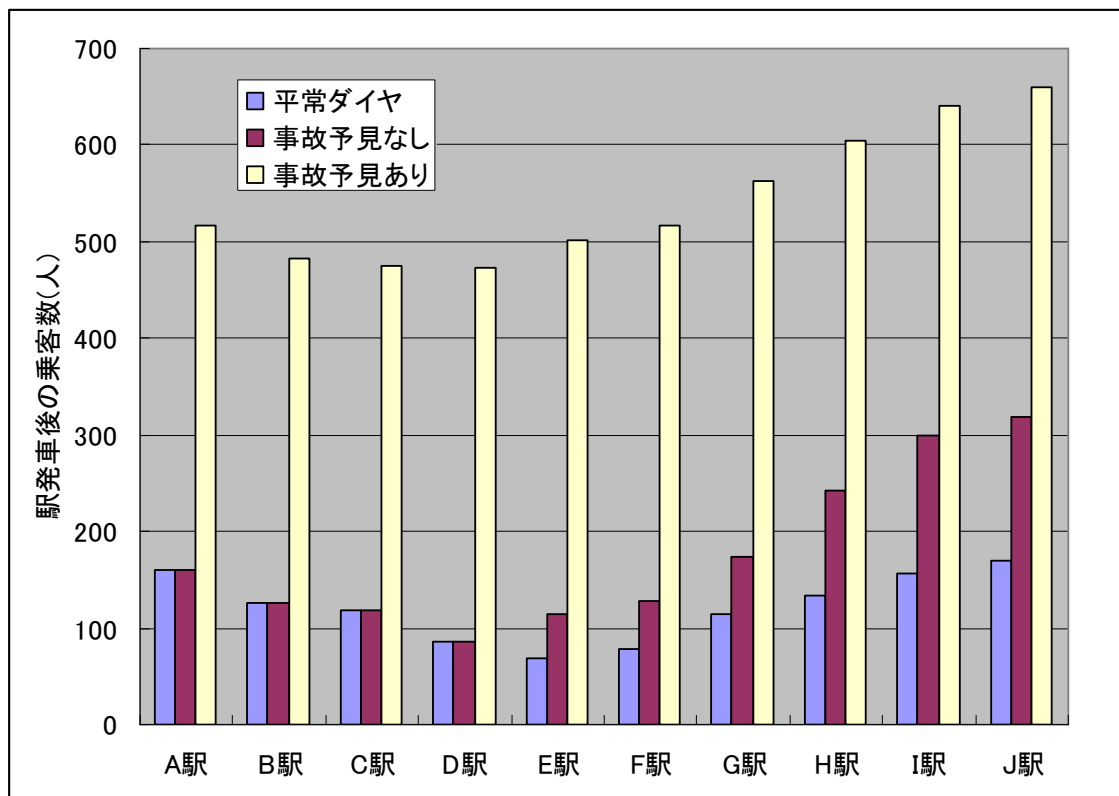


図 4.23 事故直前普通列車(203M)の駅間乗客数

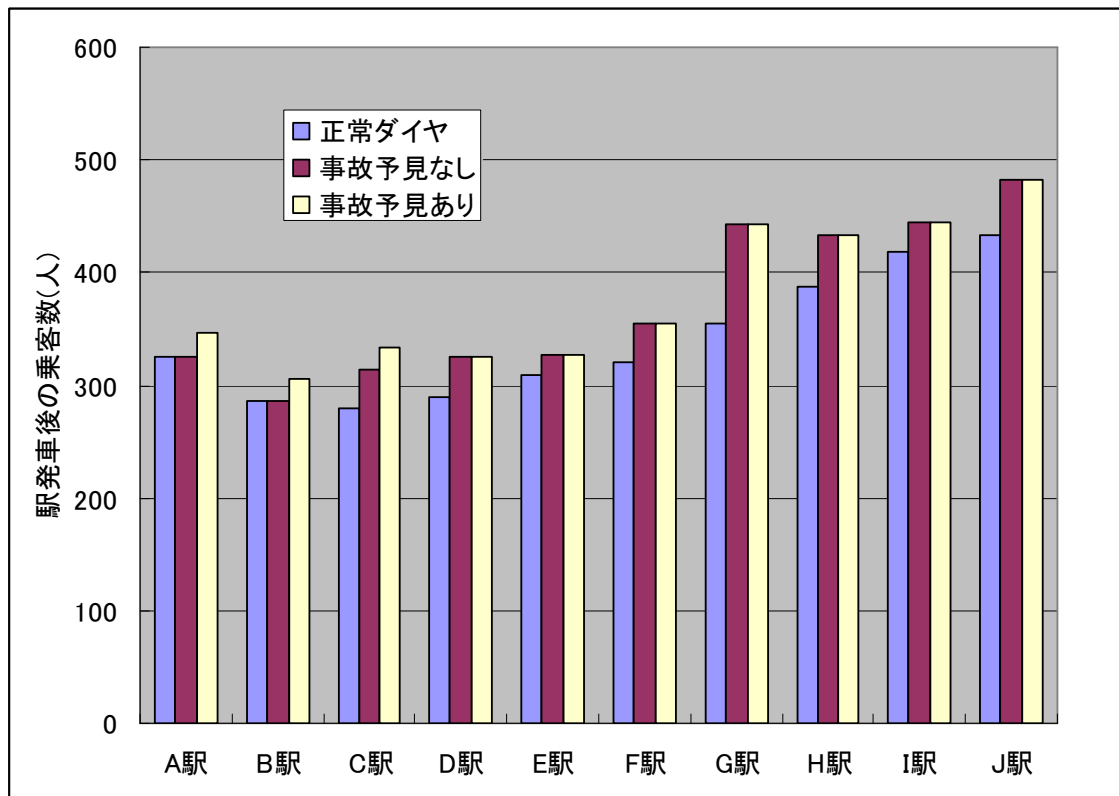


図 4.24 事故後第一普通列車（105M）の駅間乗客数

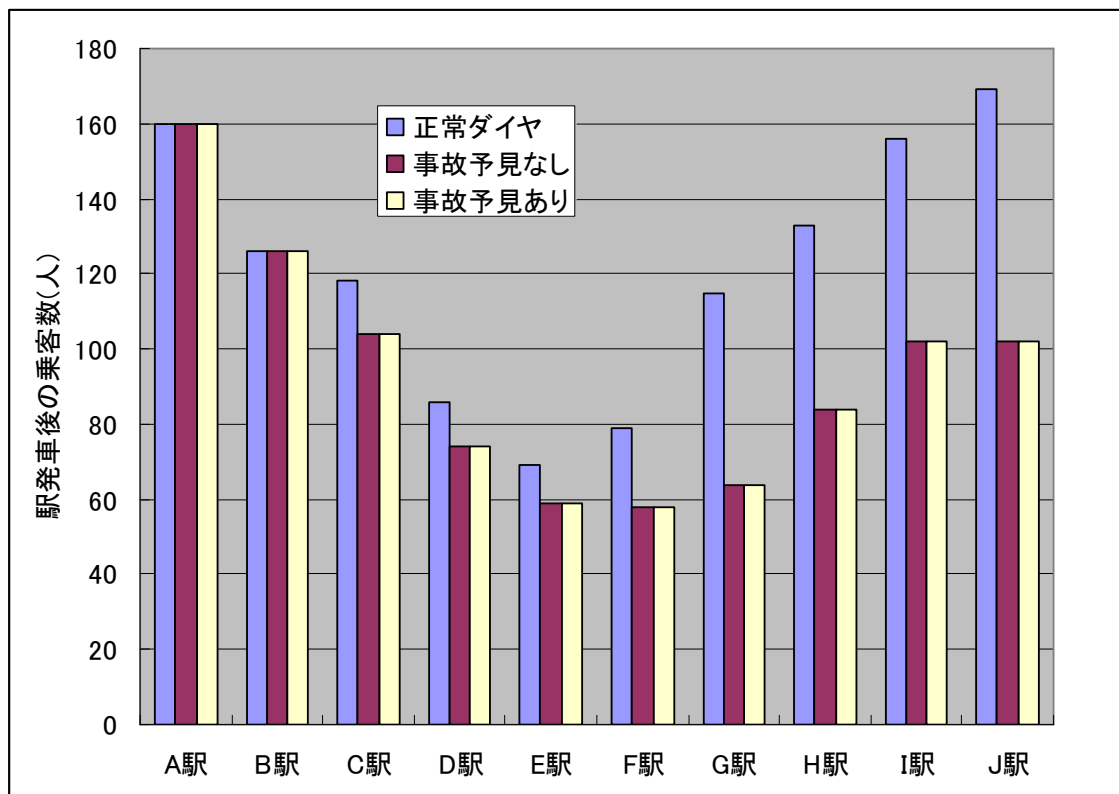


図 4.25 事故後第二普通列車（205M）の駅間乗客数

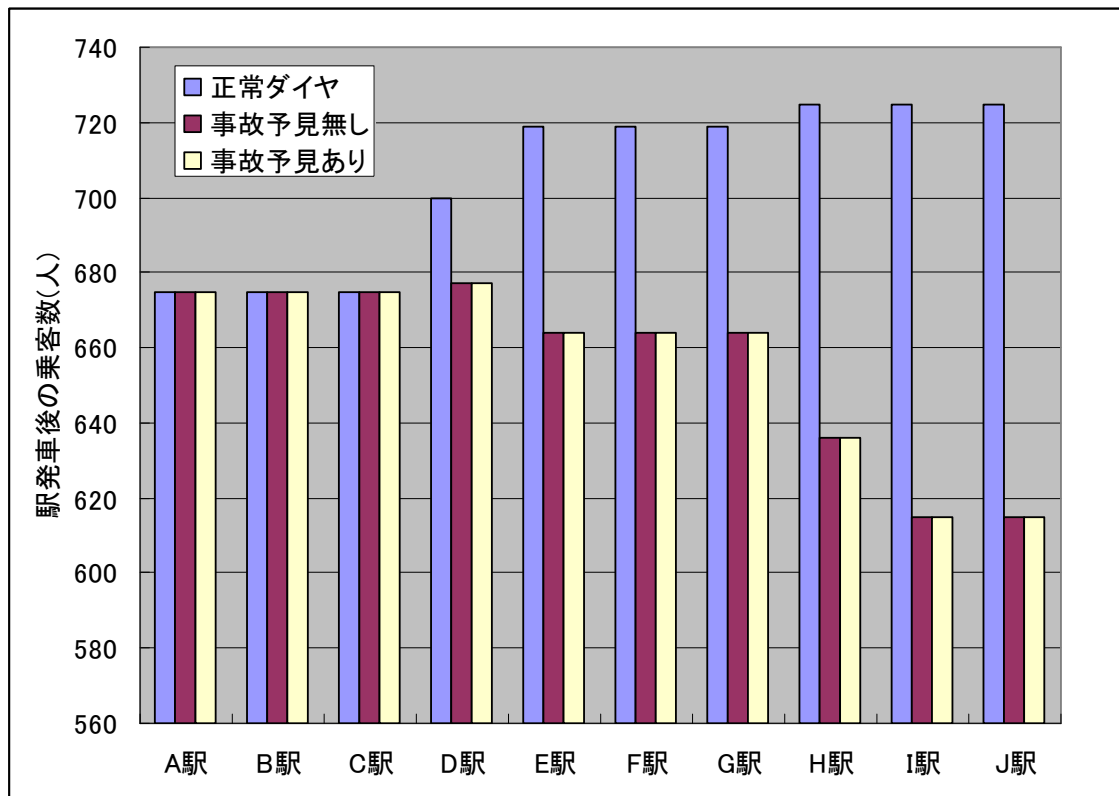


図 4.26 事故後第一急行列車（5M）の駅間乗客数

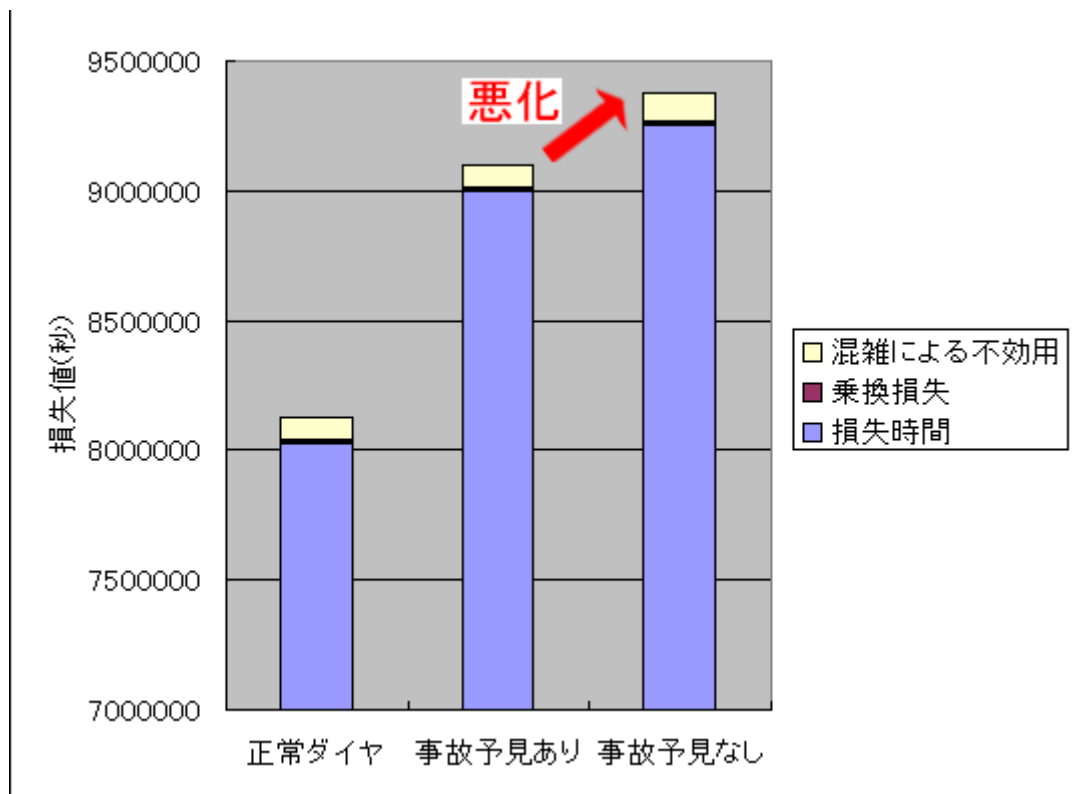


図 4.27 ダイヤの評価値

第5章

複数枚の乗客行動グラフを用いた 乗客流推定の応用

前章では、異常時における事故予見を無くした乗客流推定プログラムの実装とシミュレーションを行った。前章の手法では、事象の変化は一度きりで、事故と運転整理は同じ時間に瞬時に行われるという単純な仮定に基づいたものであった。本章では、前章で提案し実装された方法を拡張することによって可能になる運転整理の拡張について述べる。

5.1 複数枚旅客案内ダイヤの概念

前章で提案したクラス構造は、図 5.1 のように 2 つの同様の性質を持ったクラスを作り、それらのデータをコピー及び参照しながら正常なグラフを作るというものであった。この場合、実質的には、計画ダイヤである時刻 $t=0$ と、事故発生時間である $t=a$ における二つの時刻における経路関数と乗客グラフが存在することになる。これは、ダイヤが 2 枚存在し、相互でデータをやりとりすることで、最終的に事故発生時間である時刻 $t=a$ の正しいグラフ構造を求めていることになる。

これをさらに発展させたものが、図 5.2 である。前章の実験では、1 回の状態変化のみを扱ったが、理論的には複数回の変化も扱うことができる。これらは単に、複数回にわたり発生する事故に対応できるというだけではない。4.1 節で述べた、列車遅延時において考慮すべきことである増延や、4.2.2 節で述べた乗客が事故後でどのような情報をどのような順番で受け取り行動をするのかというような、時間の経過に応じて変わる状況に対応するプログラムを設計することが、複数枚のダイヤを操作することでできるようになる。

実際に実装するにあたっては、時刻 $t=b$ における事故予見グラフを作る際に、ダイクストラ法の開始点が時刻 $t=a$ であることに気をつけなければならない。前の区切りの時刻（ここでは $t=a$ ）に関しては、既に終わってしまったこととして、固定化したデータで扱われており、そこから先をダイクストラで配分していることになる。そして、その状態で事故などが発生し、ダイヤが乱れた場合、同様に時刻 $t=a$ から先のダイクストラ法による最短経路探索は、以前と同じような事故予見問題をひきおこす。このとき、あらかじめコピーして作成しておいた時刻 $t=a$ のグラフを用いて、前章と同様の処理を行

うことにより、時刻 $t=b$ における変更を予見しないグラフを作成することができる。

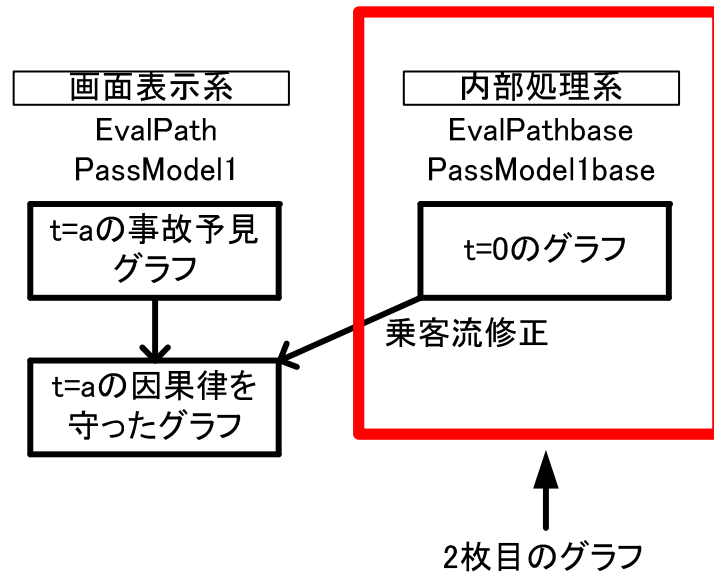


図 5.1 2 枚の乗客グラフ

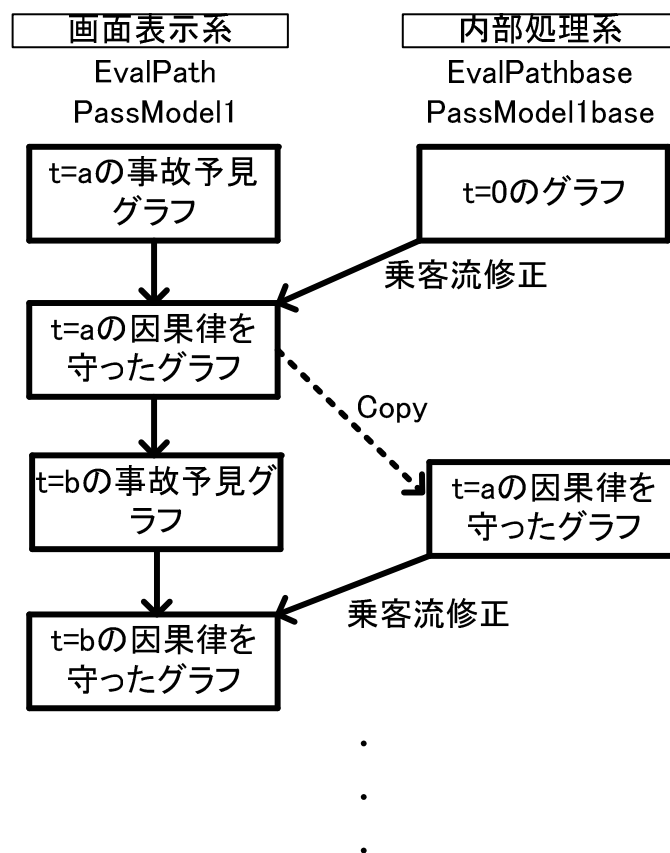


図 5.2 複数枚の乗客グラフを利用した運転整理

5.2 増延の表現方法の提案

4.1.2 節に記載したように、乗客流動が列車の運行に影響を与える例として増延がある。これは、事故によって列車が遅れたり、意図的に列車を遅延させるような時隔調整と呼ばれる運転整理を行ったりする場合とは別の、乗客の乗降によって生じる遅延を示す。

増延は、いままで行ってきた遅延と違う性質を持つ部分もある。それは、一般的に考えて乗客にとって増延の存在がわかりにくい、事業者側から見て予見が不可能とは限らないという点である。事業者側が、予定ダイヤから乗客流推定をし、増延が起きるであろう場所を予め予測できるとすれば、それを前提にして乗客を誘導することは、現在の技術や案内では不可能に近いかもしれないが、将来的には可能になるかもしれない。その場合、乗客流推定の後に、事前に遅延の発生を含めて運転整理案を組みなおすことになる。

また、別の見方として、乗客流推定を行った上で特に対策がとれず、増延がおきるべき場所で発生してしまい、それによって新しくダイヤが変わるというように考える考え方もある。この場合、乗客にとっては、予測できずにリアルタイムで遅延が発生するのであるから、ある時刻で事故が突然発生したのと同じ状況になる。これは、前章で扱ってきた突発的な事故発生が駅で発生したのと同じである。

このように、増延をどのように扱うかという問題はあるが、どちらにしても前節で述べたような複数枚の乗客ダイヤの使用によって、ダイヤを頻繁に切り取ることで表現できることが考えられる。これは従来の乗客流推定モデルでは達成できなかったことである。

例を図 5.3 から図 5.5 にあげる。図 5.3 のような事故が発生し、正しい因果律を守った乗客流推定を行ったところ、増延を生じる混雑が未来に発生することが予測できたとする。このとき、さらに図 5.4 のように新しい時刻 $t=b$ でいままでと同様にダイヤを区切る。そこで遅延が 30 秒発生したとすると、これは事故が生じて 30 秒遅延したのと同じ扱いになる。この処理を行うことで図 5.5 のような増延後のダイヤを正しく描写することができる。

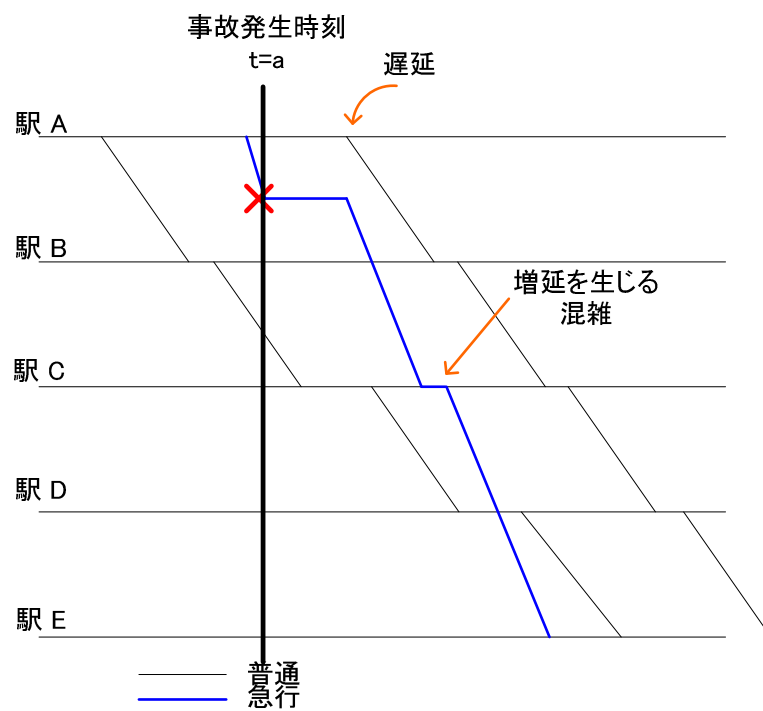


図 5.3 事故直後のダイヤ

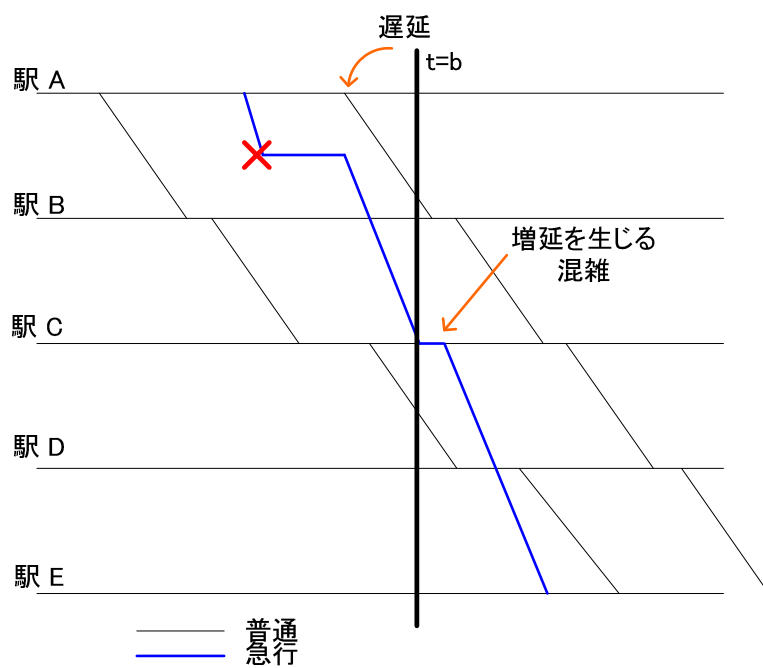


図 5.4 増延発生予測地点での二度目のダイヤ切斷

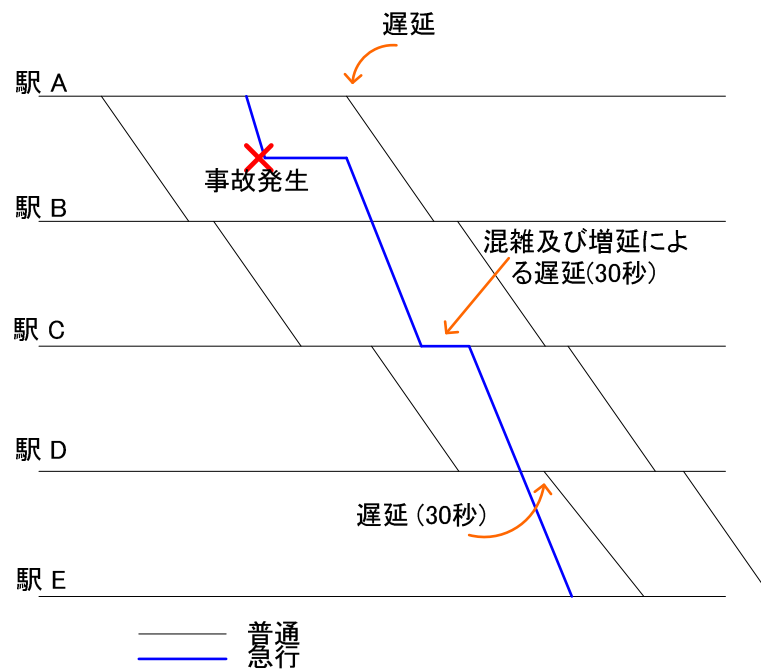


図 5.5 増延を考慮した正しい運行ダイヤの描写

5.3 乗客への事故情報の提供に時間を要する場合の表現方法の提案

4.2.2 節で述べたように、

- ・ 事故発生時刻
- ・ 運転整理開始、及び完了時刻
- ・ 乗客に情報が伝わる時刻

などの間には一定の値が存在する考えるのが普通であるが、プログラム上の実装においてはすべての時間間隔は 0 であるという仮定をおいている。また、実際に事故原因が収束する時刻は、運転整理の時点からすると未来の話であるが、予定時刻が予めわかっており、なおかつその時間に事故が正しく収束するという仮定のもとに運転整理プログラムは実装されているのが現状である。

しかし、実際は 4.2.2 節で述べたように事故発生時刻と運転整理が開始する時刻、そして運転整理が終わってから乗客にそれらの情報が伝わる時刻は異なっているはずである。時間差で乗客に対する案内が変化し、乗客にとって最短経路であるかのように見えるダイヤを変化させるには、本論文で提唱した複数枚ダイヤの概念を用いることで、

例えば事故が発生した後でも、ある時間までは本来予定されていた運行ダイヤを用いて乗客が最短経路を選択するように選ばせ、情報の伝達が終わった時点で乗客に新しい経路を選ばせることができる。

例えば、事故が時刻 $t=1000$ で起きたとしても、事故前における乗客グラフの $t=1100$ でダイヤを区切ることで、間の 100 秒には乗客に事故情報が伝わらない様子を再現できる。また、運転整理がそこで完了していても、運転整理後のダイヤにおける最短経路探索を行いなおす時間を、再度 $t=1200$ に設定すれば、その 100 秒間は運転整理を行ったダイヤが周知されていない様子を再現することができる。ただし、この場合には、周知がないとしても、運転整理の対象になっている列車に乗車している乗客が情報を知らないということはなかなか考えにくいので、そのような乗客別の情報分布についても考慮しなければならない。

第6章

結論

本論では、実現が望まれている運転整理計算機支援システムについて述べ、システムを構成する要素の中で、乗客流推定手法について主に述べた。その中でも、特に列車が遅延した時の乗客流推定を行う手法についての研究を行った。今までも、グラフ構造で乗客をモデル化し、乗客が最適な最短経路を選ぶ行為をダイクストラ法による最短検索を用いてシミュレートし、平常時における乗客流推定を行うことは可能であったが、通常時における乗客流推定は、列車に遅延が生じた運転整理の場面においてはそのまま適用するには

- ①積み残しを考慮できること
- ②乗客の乗降に伴って生じる増延を考慮できること
- ③代替交通機関が考慮できること
- ④乗客が事故を予見した行動をとらないよう状況の変化と意思決定の因果律を正しく表現できること

というさまざまな問題点が存在した。本論では、それらの問題点を示し、特に④の問題点について、実際に計算機支援に実装するためにはグラフ構造に対してどのような扱いをすべきかを示した。列車遅延時においても乗客流の推定を正しく行い、なおかつ乗客流推定を行う理由の一つである乗客視点の評価値も正しく求めることができることを示した。

また、本論では、異常時と正常時をつなぎあわせるために、二枚目の乗客グラフを実装することを提案した。複数枚ダイヤの考え方を拡張させることにより、上記の②である増延を考慮することができることを示した。また、事故がおきてから乗客が情報を知るまでの時間の遅延などの表現も、今回導入した複数枚のダイヤシステムを使うことで表現することができる。

また、運転整理計算機支援システムを構成する他の要素である、列車ダイヤグラムの変更を行う運転整理案生成プロセスにおいても、本研究の成果を活用し、乗客流推定及びその評価値を出すことによって、より上位の運転整理案の提案ができると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々の多大なご協力をいただきました。感謝の意をここに表したいと思います。

指導教官の古関隆章助教授には、研究の方向性に対する助言や論文執筆の方法などを教えていただき、また研究活動の主となった共同研究会や学生ワーキンググループ、及び毎週のミーティングなどで大変お世話になりました。深く感謝の意を申し上げます。

鉄道総合技術研究所の、富井規雄様、平井力様、浦田真一様、近藤繁樹様、工学院大学の、曽根悟教授、水野健司様、石川和嗣様、小籠亮太郎様、田淵 正紀様、阿部大峰様、上智大学の、宮武昌史助教授、井上成暁様、共同研究の場で大変お世話になりました。鉄道総合研究所の皆様からは、関連研究や先行研究などのご紹介、システムの詳細にまで至る貴重なご助言をいただき、大変研究の参考となりました。また、鉄道事業者の皆様には、実際の鉄道における列車運行や運転整理に関する資料をご提供いただいたり、指令所などの生の現場の見学の機会をご提供していただけたりと、多大なご支援を頂きました。学部時代も含め三年間お世話になったことへのお礼を改めて申し上げます。

運転整理支援システムに関する研究における先輩である、長崎祐作さん、高野求さんや立木将人さんには、プログラムを作るのに際してわからないところを細かく教えていただいたりしました。長崎さんにはお仕事で御多忙な中、e-mail で多々御指導いただき特に感謝しております。運転整理研究の後輩の原和弘君には、研究のアドバイスはもとより、自分に不足している鉄道の基礎知識を教えていただき、大変感謝しています。彼無しでは研究はできなかったと思います。

同期の山口瑛史君、福正博之君、には、同期の仲間という面での心の支えになりました。山口君には特に、学部時代に同じ研究をしていたこともあり、アドバイスをいただく機会も多く、大変研究の助けになりました。

秘書の南佳子さんには、研究生活を送るのに必要な事務作業などをやっていただき大きな支えになりました。感謝の気持ちをここに示したいと思います。その他、研究室での生活を共にした Cheung Cheuk Kei Brian 君、Suroso さん、中田貴之君、野崎雄一郎さん、鈴木武海君、にもお世話になりました。

また、多くの友人達、特に資料作成などでアドバイスをいただけた竹本将志さん、そして最後に長い間さまざまな面での支えになり、ここまで私を育てていただいた両親に深い感謝の意を表し、謝辞に変えさせていただきます。

2007年2月2日
大山 大介

参考文献

- [1] 富井規雄：“ダイヤの乱れを克服する—鉄道の運行管理システムの現状と今後—”，情報処理，vol.44，no.8，Aug. 2003.
- [2] 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.
- [3] 高野求：“運転整理支援システムのための駅構内条件の実用的モデル化と整理手法の効率的選択に関する研究”，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，2005.
- [4] 立木将人：“運転整理支援のためのグラフ理論を用いた異常時における乗客流動推定”，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，2006.
- [5] 大山大介，古関隆章，高野求：“計算機支援を前提とした運転整理手法の適用順序決定法”，電気学会産業応用部門研究会，TER-05-66,pp.63-68，Oct.2005
- [6] 村田悟，C. J. Goodman：“乗客の満足度を考慮した列車制御方式”，第34回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集，pp.100-103，1997.
- [7] 小野耕司，小谷正美：“意識調査に基づく列車混雑度分析”，第54回土木学会年次学術講演会，IV-330，1999.
- [8] 「鉄道プロジェクトの費用対効果分析マニュアル99」，運輸政策研究機構，1999
- [9] 平井・富井：“運転整理案評価のための列車別乗車人員推定手法”，鉄道総研技術報告2000年7月
- [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.

発表文献

- [1] 高野求, 立木将人, 大山大介, 山口瑛史, 古関隆章: “乗客流を考慮した都市近郊鉄道運転整理支援システムのための整理案自動生成と評価手法”, 電気学会システム・制御研究会, SC-05-14, Mar. 2005.
- [2] 大山大介, 古関隆章, 高野求: “計算機支援を前提とした運転整理手法の適用順序決定法”, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, TER-05-66, pp.63-68, Oct.2005
- [3] 立木将人, 大山大介, 原和弘, 古関隆章, 川田恭志, 高野奏, 曾根悟: “運転整理支援のためのグラフ理論を用いた異常時における乗客流動推定”, 電気学会産業応用部門研究会, TER-06-47, May.2006
- [4] 原和弘, 大山大介, 古関隆章: “方向別複々線区間における運転整理支援のための乗客流解析に基づく評価値提示システム”, 電気学会 システム・制御研究会, SC-06-5, pp.27-32, Mar.2006
- [5] 大山大介, 原和弘, 古関隆章: “判断の因果関係を正しく表現する列車運転異常時の乗客流推定法”, 電気学会全国大会, 2007 (発表予定)

付録 A

着ノードからの初期乗車の扱いについて

本論文においては、事故時でダイヤを切断し乗客に意志決定を再度行わせる場合に、あたかも乗客が一度列車から降りたかのようにモデル化している。この再行動モデルは、事故後の状態を考慮すると決して誤ったやり方ではない。例えば、各駅停車にしばらくのって急行に途中で乗るという乗換を行う複数経路から一つの経路を選択していた場合、事故が発生することによって、ひとまずは先の駅にできるだけ進める快速優先の経路を取り直す場合が考えられる。しかし、問題が生じるケースもある。

図 A.1 のようなダイヤにおける A 駅から F 駅の OD を考える。A 駅で先発の各駅停車に間に合わない乗客は図 1 の黒点線のような 2 経路をとりうる。乗換回数はどちらも 1 回で、到着時間が同じだからである。

一方、事故時のダイヤ切り分けを図 A.2 のような時間で行うとすると、事故後の経路に対してのみダイクストラ法による最短経路探索を行う。このとき C 駅から開始した最短経路探索を行い、不適切な経路を切断した後の最短経路は図 2 の点線のような状態になる。A 駅から F 駅の OD は一旦リセットされた上で C 駅から F 駅の OD に代替される。乗換回数も最短経路の要素として考えた場合、C 駅から F 駅に行くならば、乗換回数の少ない後発の普通列車にのるのが経路の取り方である。

これによって、図 1 の E 駅での乗り換えの OD がダイヤの切り分け後で C 駅の乗り換え OD に吸収されてしまう。最短経路探索は発ノードからのみ行われているため、着ノードに乗っていた情報が考慮されないからである。

これらはプログラム側からすると、乗客の配分ルールに従った結果であるので間違いではないが、現実と照らし合わせると疑問が残る要素でもある。これを防ぐためには着ノードからのダイクストラ法を実行し、乗客を配分できるようにする必要があると考えられる。

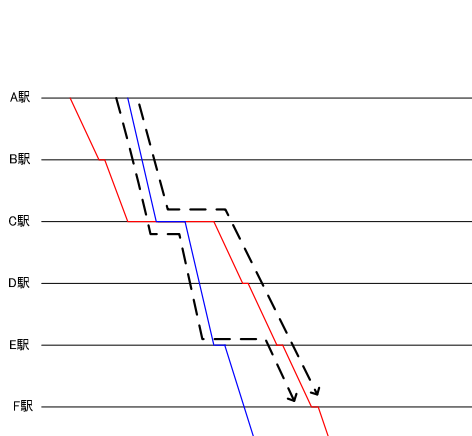


図 A.1 運行計画時の最短経路

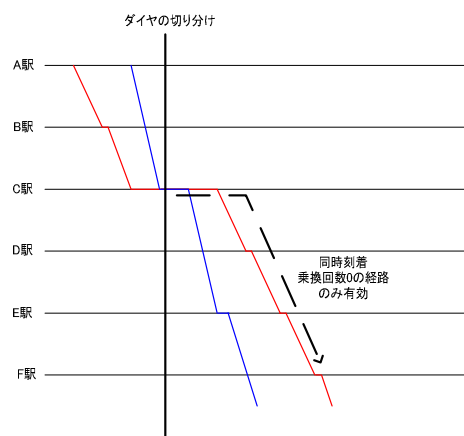


図 A.2 ダイヤを切った後の最短経路