

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

立木将人* 大山大介 原 和弘 古関隆章 (東京大学)
川田恭志 高野 奏 曾根 悟 (工学院大学)

Passenger flow estimation after irregular train operation for computer-aided train rescheduling based on a graph theory

Masato Tachiki*, Daisuke Ooyama, Kazuhiro Hara, Takafumi Koseki(The University of Tokyo)
Yasushi Kawada, Susumu Takano, Satoru Sone(Kogakuin University)

This paper deals with a method of flow analysis of train passengers base on the shortest-path search method using a graph theory. The authors focus on the case of irregular operation of trains after an accident: The passenger model has been improved from preceding studies in the sense that the passengers decide their best path immediately after an accident. The results of a case study show the effect of the improvement of the passengers' behavior model in comparison with the model in preceding studies. This passengers' flow analysis will be useful for development of a system for computer-aided train rescheduling.

キーワード：運転整理, 計算機支援, 乗客流, グラフ理論, 鉄道
(Keywords, Train rescheduling, computer-aid, passengers' flow, graph theory, railway)

1. はじめに

鉄道という交通機関は、輸送能力・エネルギー消費・安全性などの面において他の交通機関と比較して優れているという特徴があるが、一次元的な軌道上を走行することしかできない。そのため、突発的な事故や故障によって一つの列車に遅延が発生すると、その遅延が次々と周囲の列車に波及し、最終的には大きな乱れを引き起こすことがある。これを最小限に抑えるのが運転整理の役割である。

東京大学曾根・古関研究室では、ダイヤの定量的評価法と運転整理案の自動生成アルゴリズムを確立し、計算機により運転整理案を自動的に生成、提案する運転整理支援システムの研究が行われてきた。[2][3]

しかし、先行研究ではグラフ理論とダイクストラ法を用いて乗客の経路を決定する乗客流動解析を行った。この手法は、しかし、特にダイヤが乱れて運転整理を行なう場合においては、(a)あらかじめ障害発生を予見しているかのような行動を取ってしまう、(b)積み残しを考慮できていない、(c)乗客の増大による列車の増延を表現できないといった問題点がある。すなわち、事故時の乗客流動としてはそぐわない結果が出てくることになり、乗客の不満を正確に評価する上で不完全なところがある。

本稿では、上述の問題に対処するため、[2]の考えを元にして、グラフ理論を用いた乗客流動推定の際に新たな条件

や処理過程を入れ、障害発生を予見する行動や積み残しが考慮されない問題点を新たに考慮した上で、乗客流動を推定する手法について提案・検証を行う。

2. 乗客流動グラフ

図 1 に、本システムでの乗客流を表現したグラフ構造の例を示す。各列車の各々の停車駅に対して、それぞれグラフ構造におけるノードが2つ作成される。一方は列車の駅への到着を表現しており、到着ノードと呼ばれる。もう片方は出発を表現しており、出発ノードと呼ばれる。また、

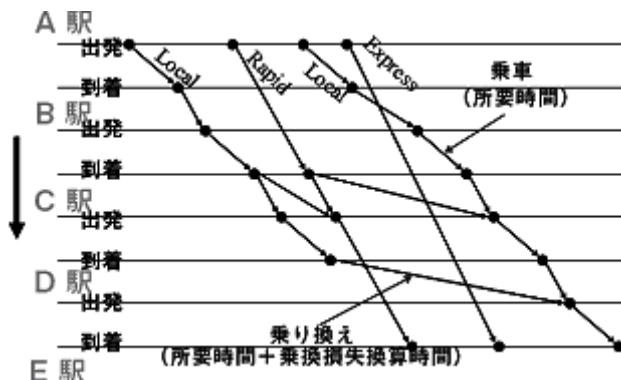


図 1 乗客行動グラフの例

Fig. 1. An example of a graph for calculating passengers' flow

到着ノードと出発ノードの間には乗り換えを表す乗換リンクも生成される。このリンクは、各々の列車の各停車駅における到着ノードから、その駅において乗り換えることが可能な別の列車の出発ノードに向けて張られる。

グラフ上の各リンクには、その重みとしてどの程度乗客にとって利用した場合にコストがかかるかを示す損失の値が割り当てられる。具体的には、移動リンクには列車の駅間走行にかかる所要時間、停車リンクには列車が駅に停車している時間が割り当てられる。

3. 乗客行動モデル

本システムでは乗客は常に合理的に行動すると考え、「各乗客は所要時間による損失及び乗り換えによる損失の和を最小にするような経路を選択し、乗車する」という条件を仮定する。

各々の乗客が同じ出発駅から目的駅を移動する場合でも、所要時間や乗り換えによってこうむる損失を最小にする移動パターンは、乗客が出発駅に到着する時刻や、目的駅に着きたい時刻によって異なってくる。本システムでは、「同一の出発駅から同一の目的駅へ移動する乗客は、出発駅に均等な時間間隔で出現する。出発駅で列車を待つ時間も所要時間に含まれる」というモデルを仮定する。

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経路を選ぶと仮定することで、乗客がどの列車を選択するかという探索問題は、グラフ構造上の最短経路探索問題に帰着される。本稿では、最短経路探索としてはダイクストラ法を用いている。

4. 異常時における相違と留意事項

運転計画時の乗客流動推定と、ダイヤ乱れ、すなわち異常時における場合に、ダイクストラ法を用いて乗客の経路を決定する乗客流動推定で全く同じ方法を用いることについては次のような相違点や留意事項があると考えられる。

- (1) 乗客が事故を予見した行動を取る、
- (2) 積み残しを考慮していない、
- (3) 乗客の乗降増大による増延を考慮していない、
- (4) 代替交通機関が考慮されていない。

〈4・1〉事故を予見した行動

先行研究では、乗客が事故を予見したかのような行動を取ってしまう場合がある。例えば、列車に遅延が起こった状況を考える。通常ダイヤが図 3(a)で、また乱れた後のダイヤを図 3(b)で示す。急行列車はB駅で普通列車を追い抜くため、A駅からC駅に向かう乗客は、普通列車の発車前である時刻0～pの時間帯においても、初めから急行に乗車することになる。事故時は急行列車に遅延が生じたため、先行する普通列車はB駅で急行を待たずに発車している。

しかし、先行研究では平常ダイヤから事故後ダイヤへの移行に関して平常ダイヤも事故後のダイヤもまとめて一つのダイヤとして取り扱っているため、図 3(b)の列車運行か

らグラフ構造を判断して評価する限り、時刻0～pにA駅にきた人にとっては、A駅からC駅へは普通列車に乗り通すことが最速となる。そのため、普通列車の発車前にA駅にやって来た乗客は普通列車に乗車するが、これでは事故後のダイヤまで全て情報を知った状態で行動するため、事故を予見したかのような行動を取っていることになる。

実際にはこういうことは起こりえず、乗客は事故が起きるまでは平常ダイヤが続くものと仮定して行動を決定し、平常ダイヤに従って乗車する列車や乗換する駅を選択する。事故が起きた段階で状況が変化し、改めてどのように行動すればよいかを決定していると考えられる。

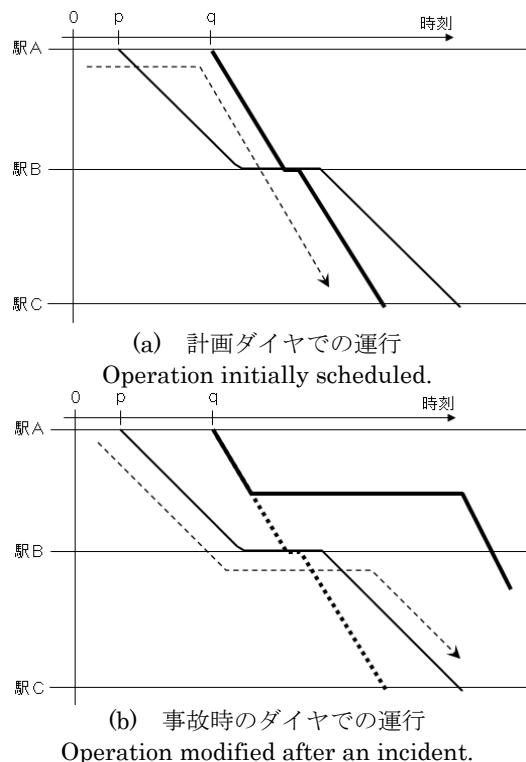


図 2 事故を予見して行動する場合の問題概念図 (太線...急行、細線...普通、矢印点線...従来手法での最小損失経路)
Fig. 2. Schematic view for explanation of the virtual behavior of passengers predicting new train diagram rescheduled after an incident.

〈4・2〉積み残し

運転整理時には通常通りの運転本数が確保できず、また列車間隔も開くことにより乗客が特定の列車に集中するといったことが起きる。特に、列車が運転再開した後の通過運転を行なう優等列車においては、多数の乗客が各駅で乗り込むことになり、全ての乗客が乗り切れなくなる「積み残し」が発生する。

非常に多くの乗客が単一の列車に集中する解が採用された場合、車内に人数制限なく乗車することになるため、現実とは異なる乗客流動が推定されることになる。計画ダイヤ時では朝ラッシュ時の特定区間でしか積み残しを考慮する必要はないと考えられるが、事故等の異常時では一定時

間以上の運転休止が起こった場合、乗客集中が簡単に起こりうる状況にあるため、異常時の推定としては積み残しを考慮したものであることが望ましい。

〈4・3〉 停車時間の増大による増延

前の2項目は純粋な乗客流動の問題であるが、乗客流動によって列車の運行に影響を及ぼす例として、乗客増大による増延がある。通常数の乗降であれば、通常ダイヤで各駅に設定された標準停車時間内の乗降が可能であるが、それをオーバーした場合には発車時間が設定時刻よりも遅れ、次駅以降の時刻も全て繰り下がることになる。また、該当列車の直後に列車が存在した場合、僅かではあるが後ろにも遅延が生じることも考えられる。

〈4・4〉 代替交通機関

路線に事故等の異常時が発生した場合、乗客によっては目的地まで行く際に該当路線を使わず、そもそも他の交通機関を用いて目的地まで移動する例があると考えられる。

本稿では、事故を予測することの回避と積み残しについて取り扱うものとする。また、代替交通機関については各駅間に与えられる需要(OD)が閉じたものであり、事故線内での乗客流動を算出するものであるため、扱わないものとする。事故の発生によって移動自体を中止する人も存在すると思われるが、前述の理由で本研究の対象外とする。

5. 事故を予測した行動の回避

<4.1>にも記した通り、事故を予測した行動を回避し乗客行動を正しくモデル化することは、本質的には、乗客の事故後の行動仮定に関しては、事故後にどのような情報が与えられたかを適切に扱うことに帰着される。情報伝達が発達し、全ての乗客に運転整理後のダイヤが周知される場合、事故後に全ての運転整理ダイヤを知っていると仮定でき、また、周知が全くない場合は、乗客はとりあえず来た列車に乗車し、行けるところまで行くことになる。

実際に事故が発生し、事故を把握し運転整理を開始するまでに、現在の鉄道運行機関ではタイムラグが発生する。具体的には図3のような時間的経過に従うと考えられる。

以下の前提としては、事故発生から運転整理案が作成され、実施されるまで短時間で実施されることを前提とする。すなわち、図3において、 $n=0$ という条件とする。

また、乗客は事故が起きた際、事故後のダイヤは全ての乗客に一齐に通知され、乗客は事故後の運転整理ダイヤを全て知ると仮定する。また、事故後のダイヤは運転整理手法を適用した状態とし、乗客は損失が最小となるような経路を選択するものとする。

グラフ上の乗客流動解析は、2種類のグラフを切り替えることで実現する。図5に概要図を示す。この図ではA~Eまで5つの駅が存在し、太線は急行(A・C・Eのみ停車)、細線は各駅停車である。○は乗降のノードを示す。

まず、図4(a)に示すように、計画グラフにおける乗客行動シミュレーション用のグラフ構造を作成し、各駅間の○

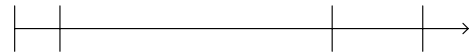


図3 運転整理開始までのタイムチャート
Fig. 3. Time chart before the start of rescheduled operation.

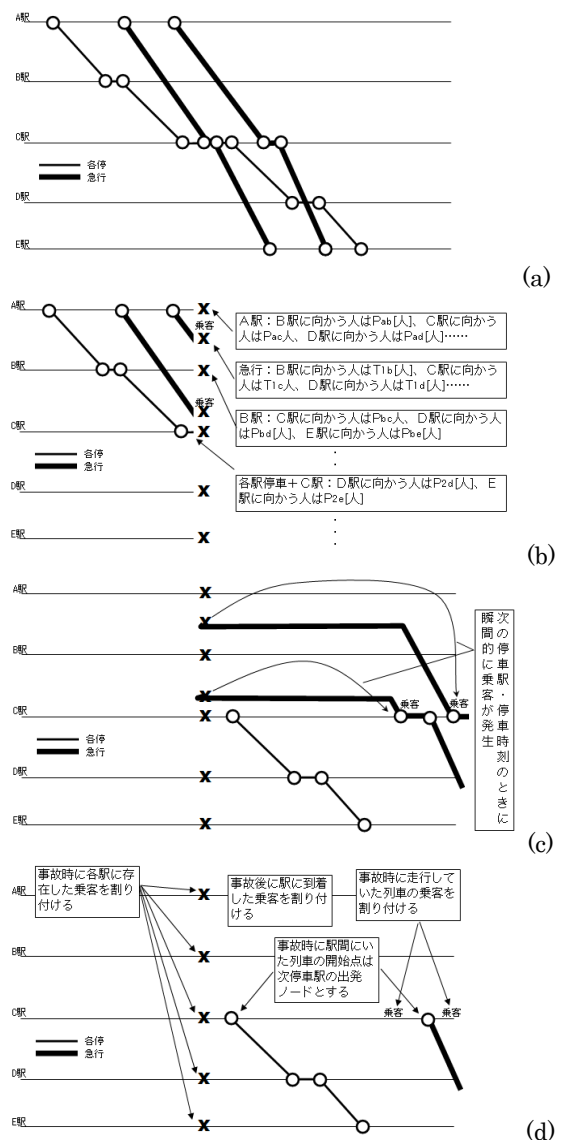


図4 事故を予測した行動の回避
Fig. 4. The modeling methodology for the flow of passengers without prediction of rescheduled train operation.

Dをもとに各々の経路間を移動する乗客に対して経路を割り付け、各々の列車に対する各区间での乗車人員を決定する。ここまでは従来手法と同様である。

次に、事故時における各駅の状態を調べる。事故時の時刻の時点において、図 4(b)に示すようにそれぞれの駅で、各々の駅に向かう客が何人いるかを算出する。また、同時に事故時の時刻における各列車の在線状況を調べる。各々の列車がどの駅間にいるかを調べ、そのときに各列車においてそれぞれの駅を目的地とする乗客が何人存在するかを記憶する。なお、駅に停車中の場合には全員が駅に一旦降車したもとして駅で待っている乗客と同様に考える。

次に、事故後の時刻以降のみにおいて、事故の起こった後のダイヤを元にグラフ構造を作成する。また、事故発生時に各々の列車内にいた乗客は、それぞれの列車が次駅に到着する時刻に駅で瞬間的な需要が発生したもとする。このときの乗客状況を図 4(c)に示す。

最後に図 4(d)に示すように、事故後に駅にやって来た乗客のみを割り付けることで、各列車における各区间の乗客数が求まり、乗客流動の推定が可能となる。今回評価対象とした路線は、都市近郊の路線2線で、図 5 にその構造を示す。駅 1 から駅 35 までの本線があり、その途中の駅 26 から駅 37 までの支線が分岐しているという構造である。駅 1 が都心側に存在している駅であり、駅 2～駅 37 までの乗客の多くは、駅 1 との間を移動する。路線はこの区間では駅 26～駅 37 間の支線を含め、全線複線である。また、この路線には急行と各駅停車の 2 種類の種別が存在し、それぞれ 1 駅基準で 1 時間当たり 6 本ずつ運転されている。

モデル路線は昼間は 1 時間周期のパターンダイヤとなっており、13時から14時のダイヤと乗客需要を入力した。

ここでは、2つのケースを設定して検証を行なった。先

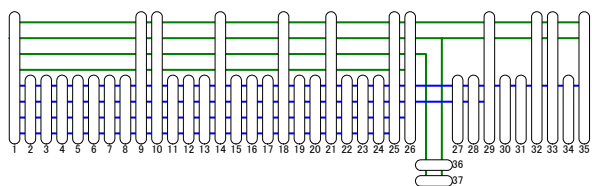


図 5 対象路線の路線図
Fig. 5. Stations and lines for a case study.

行研究との比較のため、遅延が起こったときに適当な運転整理が行なわれたと仮定して、先行研究の手法と提案する手法の比較を行なうものである。

一番目のケースにおける事故の概要は、図 6 の通りである。(a)が平常ダイヤ、(b)が事故ダイヤであり、(b)は時刻 1:10:00 において、急行列車 3007M が 2 駅～3 駅で 8 分余分に所要時間がかかり、遅延が起こったとする。このとき、前を走る普通の待避駅が運転整理手法を適用して変更したもとする。

このとき、遅延した急行列車の乗降客数のグラフを図 7 に示す。縦軸は、各駅発車後の該当列車に乗車している乗

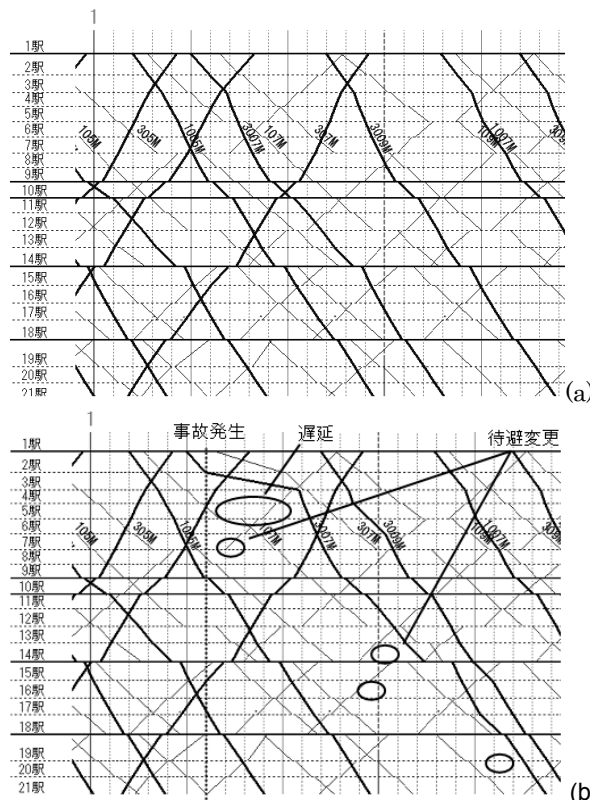


図 6 設定した遅延ダイヤ
Fig. 6 Initial and rescheduled train diagram for a case study.

客数を示している。また、各々の縦棒は、紺色が平常ダイヤにおける運転、緑色が従来の手法である事故を予見したときの乗客数、オレンジ色が事故を予見する回避する方法を元に組み立てた流動の場合の乗客数である。

この事故を起こした急行列車では、事故を予見した場合の事故区間を含む乗客数は、予見がなかった場合と比べて半分ほどになっている。これは、事故発生予め分かっている予見的に行動した場合、乗客が損失の大きい列車を避けつべく逃げてしまうため、長距離を動く乗客は主として前後の急行列車に移動した。

なお、事故が起きればそこで改めて事故後の経路を決定

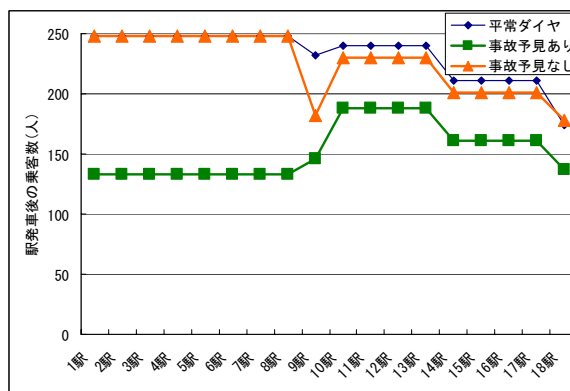


図 7 事故急行列車の乗客数
Fig. 7. Variation of number of passengers in the train which has been initially caused delay.

するので、予見がない場合でも事故が起こった次の停車駅からは流動が変化することになる。

また、同様に待避変更が起きている例として、事故の2本前の普通列車の乗客数を図8に示す。図6(b)により、普通305Mは駅14~18において、計画ダイヤとは異なり事故を起した急行列車よりも先行している。図8には、該当部分となる駅14~18のそれぞれ発車後における乗客数を示した。ここで、普通305Mは駅18で後続の急行を待避するため、駅15から18に向けて乗客が乗り込んできて、駅18で下車もしくは後続の急行に乗り換える動きが多くなっていると推測されるが、予見ありとなしの2つの場合で、ほぼ乗客数に差がなくなっている。これは、事故発生時から時間が経ち、また事故発生時に全ての事故後における情報を乗客に瞬時伝達され、乗客は経路を選択するという前提によっているため、事故時刻における乗客行動変化の影響が少なくなったためと考えられる。

さて、同様に乗客転移が大きく起きる例として、2番目のケースとして図6(b)のダイヤで、遅延した急行列車が14駅で運休した場合の乗客流を計算した。

この場合、遅延した急行列車に運休がなかった場合の乗客流である図8と比べると、事故を予見した場合の乗客数はさらに少なくなっていることがわかる。事故区間を含む1駅~9駅の乗客数に関しては、事故のなかったときのおよそ5分の1となっているが、これは1駅から14駅以内の間を利用する乗客しか利用せず、また該当の急行の前後に

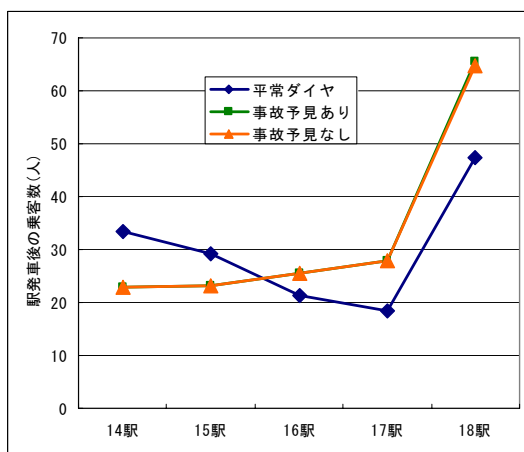


図8 2本前の普通列車の乗客数
Fig. 8. Variation of passengers' number in the train before the preceding one for the initially delayed rapid train.

列車が走行していることもあって、この列車が有効（損失が最小）となるような経路となる乗客数が少なかったことが原因である。ここで逸走した乗客は、図10に示すような後続の1本後の急行に乗客集中していることが分かる。

なお、このような乗客流動となった場合の運転整理における評価値がどうなるかという問題であるが、乗客流動における乗客の損失[2]は平均しておよそ数%の悪化となった。定性的に、乗客が事故後のダイヤを予見して最初から

行動した方が損失の少ない経路を選べるので、ここで行った乗客行動モデルの改良のために先行モデルと比べて評価値自体が悪化することは自然な変化である。

事故を予見して普通列車に多くの乗客が乗っていて、急行列車に乗客が少なかった場合は、普通列車を待たせると多数の乗客にとって所要時間が延び、評価値が悪化すると考えられる。逆に普通列車に乗客が少なく、急行列車の乗客が多ければ、普通を待たせることで急行から普通に乗換えられる乗客が相対的に多くなり、評価値はよくなる。このように、各々のリンクの重みに割り付けられる乗客数が

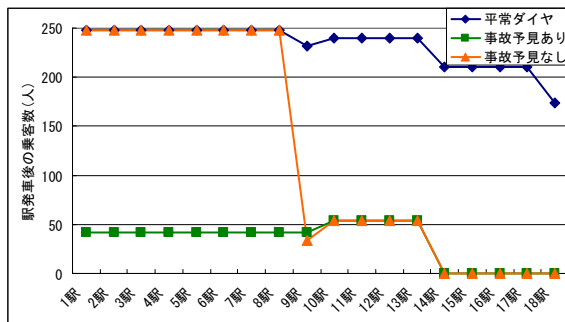


図9 事故急行列車の乗客数
Fig. 9. Number of passengers in the initially delayed rapid train.

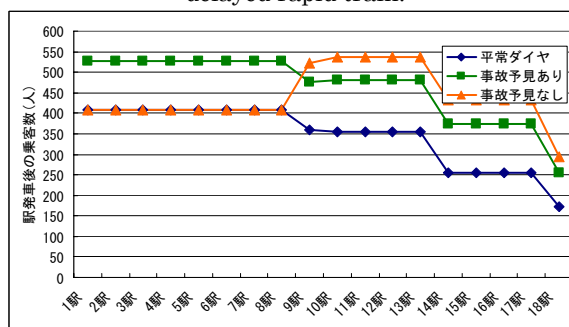


図10 事故の1本後の急行列車の乗客数
Fig. 10. Number of passengers in the train after the initially delayed rapid train.

変化することで正しい評価改善手法が選択されうるという点においても、ここで述べたモデルの改良は有益である。

一方、例えば図9に見られる通り、急行列車の駅9から先の乗客数は、予見した場合と同様、小さな水準に留まっている、現実の感覚に合わないという問題点もある。現実には、乗っている列車が途中駅で運転を打ち切ることに変更された場合であっても、元から急行に乗っている客はそのまま行けるところまで行き、そこに到着後改めてその先の行動を考えることが多い。しかし、本モデルでは、事故時に瞬時に運転整理案が通知される仮定となっているため、事故時に列車内にいた乗客は事故が起きたら一旦次の駅で下車し、変更後のダイヤ情報を得て改めて経路を選択するため、このようなことが起きると考えられる。

本稿のモデルでは、グラフで乗客流動を扱う際に、乗客行動は最小損失となる経路を必ず選択するという仮定に基づいており、乗客が行動を選択する際は列車ダイヤが既に与えられている必要がある。しかし、実際には事故が起

こって運転整理が開始されるまでには無視できぬ時間を要する。したがって、ここで生じた問題を解消するためには、事故時から運転整理開始までの乗客行動をどう表現するかを今後さらに考察する必要がある。

6. 積み残し

運転整理時においては長時間列車が来ない場合があるため、駅にやって来た乗客や乗換えのために駅に滞留している乗客が大人数になり、目的とした列車に乗車できない場合がある。乗れない場合は当該列車への乗車をあきらめ、改めて最小損失となる経路を選択すると考えられる。

ここで、誰が積み残されるかという条件を簡単に一意に扱うために、乗客が各々のドアの前で分散して待っているのではなく、ホーム上で一列に並んで乗車を待つというモデルを考える。なお、乗客は目的となる乗車列車ごとに列を形成しているものとする。

積み残しの際に、乗客の被る損失が積み残されることでどのように変化するかを調べるため、新たに積み残しを考慮した乗客流動の推定と検証を行なう。ここでは、特定の列車に乗客が集中し、積み残しが起こった場合にどのような乗客が積み残しされるかを同時に調べるため、長距離を走破し、乗客数の多い急行が運休した場合を考える。

具体的には、ダイヤは 6 章の事故を予見した行動で用いた運転整理ダイヤ (図 6(b)) を変化させ、さらに事故急行とその 1 本前の急行がそれぞれ駅 10 で運行を中止したとする。ある程度の距離を移動する乗客は、10 駅を乗車駅とする乗客も含め、後続の急行を駅 10 で待ち、一斉に乗り込んで積み残しが起こる状況が想定される。なお、ここでの限界定員は、各列車に定められた定員の 250% で積み残しが起こるとする。

このとき、事故を予見せずに行動した場合で考えると、急行 3009M は 5 輛編成で定員が 240 人のため、250% にあたる 600 人で積み残しになり、該当列車には総計 677 人が乗車するため、積み残しが発生する。なお、他の移動リンクにおいては、限界定員を超えた場所は見られなかった。

この場合、77 人が積み残されることになる。この 77 人の分配について、以下の 2 通りの場合を計算し、乗客の被る損失を比較した。

(1) 遠距離の客から優先して乗車させる場合

この場合、駅 14~駅 20 を目的地とする乗客は全員乗車できず、駅 21 を目的地とする乗客は 1 人のみ乗車できず、駅 22 以遠を目的地とする客は全員乗車できる。

(2) 近距離の客から優先して乗車させる場合

この場合、駅 26 を目的地とする乗客以外は全員乗車できる。駅 26 を目的地とする乗客は 90 人いるが、このうち 13 人のみ乗車できる。

上記の 2 通りを比べた場合、遠距離の客から優先させた場合は、積み残された乗客による損失の増加は 2.66×10^4 [s]、近距離の客から優先させた場合は損失の増加が 7.55×10^4 [s] となる。すなわち、近距離を優先した場合

は、増加分で比較して三倍近くの損失を生じることになるので、遠距離の客を優先させたほうが良いことが分かる。

ここでは、モデルとして扱った路線が典型的な大規模都市と中規模都市を結ぶものであるため、両端間の需要が比較的多く、急行列車に乗る乗客が、遠距離を乗りとおす割合が相対的に高いため、遠距離客を優先させたほうが良いという結果になったと考えられる。遠距離客は旅行時間も長いため、優先度を下げた場合の所要時間の増分も長くなる可能性がある。

本モデル路線とは異なって各駅間の需要 (OD) が一律に近い場合等でも、同様に遠距離を優先して乗車を行なった場合が良いと考えられる。一方、途中に大きな需要のある駅が存在する場合は、定性的にそこを目的地とする乗客を優先して乗車させ、残りは目的地の距離が遠い順に乗車させると良い場合も考えられる。このようなケースを本稿の乗客流動解析で具体的に評価することが可能である。

ここで述べたプログラムの欠点は、積み残しの処理を行なうことで、動作時間が長くなってしまふことである。本アルゴリズムでは、各々のリンクの乗客数を確認し、限界人員を超えた場合にそれ以降の乗客行動の再計算を行なうという処理が積み残しがなくなるまで再帰的に続けられる。このため、長い時間列車の運行が正常に戻らず、積み残しが複数回出るような状況においては長い計算時間を要することになる。

7. 結論

本論では、通常時の乗客行動と異常時、運転整理時における乗客行動についての相違点や留意事項があるため、その問題点とそれらを考慮した上での有用なシミュレーションを行なう手法を提案し、実在の路線や旅客需要をモデル化して数値実験を行なって、その効果を検証した。

本稿では事故の起こった時点で区切るという手法を提案したが、実際には事故が起こってから運転整理が開始されるまでには無視できぬ時間があり、より現実に近くするために事故発生から整理案実行にいたるまでの時間帯を更いくつかの段階に分け、乗客行動を推定する必要がある。

また、本稿の手法では乗客が一意に決定される損失が最小となる経路を選択したが、実際には、速達指向に加え着席指向など様々な行動原理が考えられ、乗客によって何を優先するかが異なる。このような行動の多様性を扱うモデル化の研究も望まれる。

文 献

- (1) 高野求, 立木将人, 大山大介, 山口瑛史, 古閑隆章: “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) 川田恭志, 曾根悟, 高野奏, 立木将人, 古閑隆章: “運転整理における乗客の不満を評価するための乗客行動シミュレーション”, 鉄道技術連合シンポジウム J-Rail 2005, Jan. 2006.
- (3) 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.