

# 運転整理計算機支援のための 列車運転乱れ時の因果律を考慮した旅客流動推定法 Causality-based Passenger Flow Estimation in Irregular Train Operation for a Computer-aided Train Rescheduling System

○原 和弘  
東京大学

熊沢 一将  
東京大学

古関 隆章  
東京大学

Kazuhiro Hara  
The University of Tokyo  
hara@koseki.t.u-tokyo.ac.jp

Kazumasa Kumazawa  
The University of Tokyo  
kumazawa@koseki.t.u-tokyo.ac.jp

Takafumi Koseki  
The University of Tokyo  
koseki@koseki.t.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** Rescheduling train operation is often needed when train operation is disordered by physical injuries, vehicle malfunction, signal troubles, and so on. Main tasks for it are presently taken by train dispatchers with their experience and intuitions. It is hard to reschedule train operation in short time, considering many factors concerning train operation without any established algorithm for creating a new appropriate plan or evaluating the plan of train operation.

The authors' group proposed a method to rate a train operation plans quantitatively from passengers' point of view. The authors furthermore developed a system for supporting the task of the train rescheduling by proposing and evaluating a new plan of train operation.

In this paper, the authors propose a causality-based passengers flow estimation method, that reflects their behavioral alteration in irregular train operation and implement it. And the authors verify the effect by using a model line.

## 1. はじめに

鉄道では、列車はあらかじめ綿密に定められた列車ダイヤに従い運行されている。そのため、人身事故や車両故障、信号故障などにより列車の運行に少しでも乱れが生じると、それがダイヤの様々な部分に影響を及ぼし大きな混乱に陥ってしまうことがある。そこで、列車の運行が乱れたときには適切にダイヤを変更して波及を防ぐ作業が必要となる。これを運転整理と呼ぶ。

現在、運転整理の作業は指令員によって人手で行われている。運転整理を実施するためには列車の在線位置や線路配置、乗務員の所在や旅客需要など様々な条件を考慮する必要がある。また、実際の状況が不明確な中でも適切な判断を迅速に下さなければならない。しかし、適切にダイヤを変更するための明確なアルゴリズムや、変更されたダイヤを評価するための指標が確立されておらず、指令員は勘と経験に頼って運転整理を行っている

ため大きな負担となっている。このため、指令員の運転整理業務を支援するシステムが必要とされている<sup>[1]</sup>。

先行研究より、乗客の行動モデルを仮定し列車ダイヤを乗客の視点から定量的に評価する手法の研究が行われてきた<sup>[2]</sup>。また、列車運行が乱れた際に計算機が適切なダイヤ変更を行うアルゴリズムと組み合わせることで、運転整理案を提案するシステムの開発を行っている<sup>[3]</sup>。

従来使用していた計画ダイヤ時を対象に作成された旅客流動推定を列車運転乱れ時にそのまま適用すると、あらかじめ障害が発生することを予見しているかのような行動をとってしまうという問題点があった。そこで本研究では、グラフ理論を用いた旅客流動推定に新たな条件や処理過程を導入し、列車運転乱れ時における因果律を考慮したものとするための方法を提案する。また、モデル路線を用いその効果を検証する。

## 2. 運転整理支援システムの構成

運転整理支援システムは、列車がどの位置でどの程度遅延したかという情報を基にして様々な変更を加えることで最適なダイヤを生成する。

システムはダイヤの生成とその評価という2つの大きな部分からなる。ダイヤの生成では、与えられたダイヤに変更を加え、列車運行シミュレーションによって各駅の着発時刻を決定する。ダイヤの評価では、乗客の流動を推定し乗客の視点に立った評価値を算出する。この評価値を基に新しいダイヤ案の採否判断を行うという処理を繰り返すことで整理案を作成する。そして、その整理案を指令員に提案するという構成となっている。

## 3. 運転整理案の作成

### 3.1. 運転整理案作成の流れ

列車運行の乱れによって所定の列車順序や走行線路では運行に支障が生じる場合に、その変更を行い遅延の波及を防ぐ。システム上での運転整理案の作成は、各種運転整理手法の適用部分と列車運行シミュレーションによる着発時刻の決定部分からなる。

### 3.2. 運転整理手法の適用

列車の順序や使用する番線の変更など各種運転整理手法を適用し、適切にダイヤに変更を加えることによって乱れの波及を防ぎ、乗客が被る迷惑が小さなダイヤ案を作成する。

運転整理案の一例として待避変更と呼ばれる手法を図1に示し説明する。(a)は所定のダイヤを示しており、駅Aで普通列車は急行列車に追い越される。(b)は急行列車が遅れた状況を示す。急行列車の遅れによって、普通列車は長時間急行列車の到着を待つことになるため遅延の影響を大きく受けることになる。(c)は(b)のダイヤに待避変更を適用したものを示している。待避変更とは列車が追い抜きを行う駅を変更することを意味し、この図に示す例では急行列車が普通列車を追い越す駅を駅Bに変更することで普通列車に及ぶ遅延の影響を抑えている。この段階では列車の順序や使用する線路・番線などの変更を行うのみであり、着発時刻は決定していない。

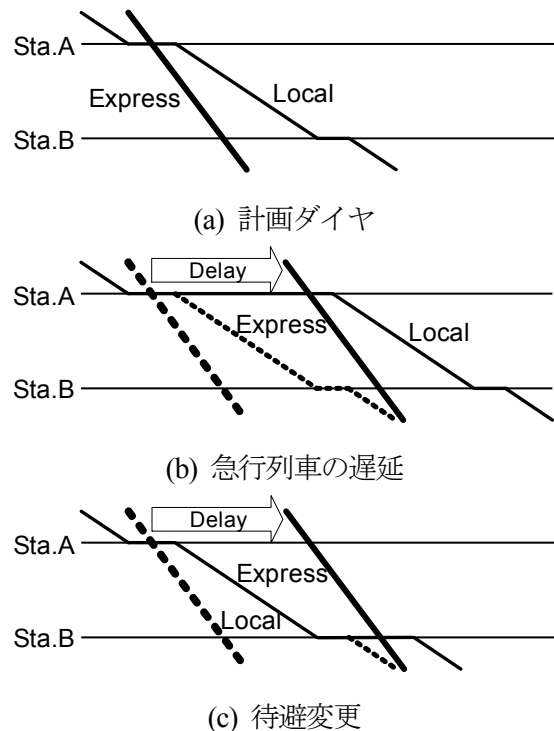


図 1: 運転整理手法の例

### 3.3. 列車運行シミュレーション

列車の運行には以下に示すような様々な制約条件がある。

#### 3.3.1. 列車ダイヤ

列車は定められた時刻よりも早く運転しない。

#### 3.3.2. 基準運転時分

駅間の走行には車両形式や両数、停車・通過により定められた一定以上の時間を要する。

#### 3.3.3. 最小停車時分

停車駅には一定時間以上停車する。

#### 3.3.4. 列車順序

ダイヤに定められた順序で走行・停車する。

#### 3.3.5. 閉塞

一定数以上の列車は駅間を同時に走行できない。

#### 3.3.6. 時隔制約

駅において走行線路が競合する列車間には一定の時間間隔を要する。

これらの制約を全て満たした上で各列車が一番早く運転した場合の着発時刻を求めるために、列車運行を図2に示すようなグラフ構造で表現する。列車の到着・出発をノードで表し、各ノード間には走行・停車を表すリンクの他に、前述の各種制

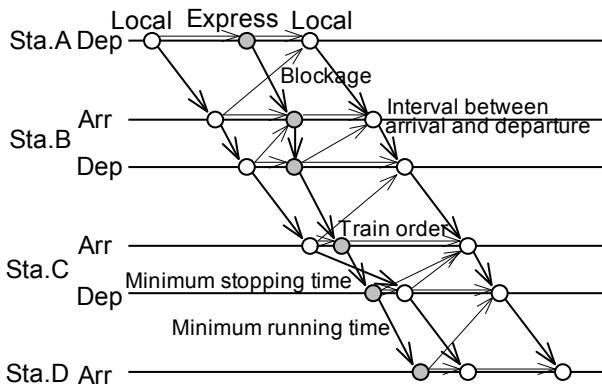


図 2: 列車運行グラフの例

約条件を表現するリンクを張る。各リンクの重みはノード間に必要な時間間隔を表している。基準時刻を表すノードから各ノードへの最長経路をPERT(Program Evaluation Review Technique)を用いて求めることで、各駅の着発時刻を知ることができる<sup>[4]</sup>。

前節で述べた運転整理手法適用による変更を表現するためには、各種制約リンクの関係を適切に変更する必要がある。

## 4. 運転整理案の評価

### 4.1. 運転整理案の評価指標

運転整理案の評価には、全列車の遅延の総和が小さいほどよいという方法が、簡便であり迅速に計算できるため従来実務でよく用いられてきた。しかし、この方法を単純に評価に適用すると、遅延した列車を全て運休とした場合、遅延はなくなりよい整理案と評価されることになる一方、実際にはホームに人があふれてしまいこの整理案が良くないことは明白である。

そこで、本研究では乗客の視点に立ち整理案の評価を行う。旅客流動を推定することで各列車の乗客数を把握し、それぞれの乗客が受ける損失を合計し評価値としてダイヤ案比較に用いる。

### 4.2. 乗客行動シミュレーション

本システムでは、乗客は出発駅に均等な間隔で出現し、目的駅までの所要時間・乗換による損失が最小となるよう行動する乗客を仮定している。このモデルは時刻表を見ずに駅にやって来て、そ

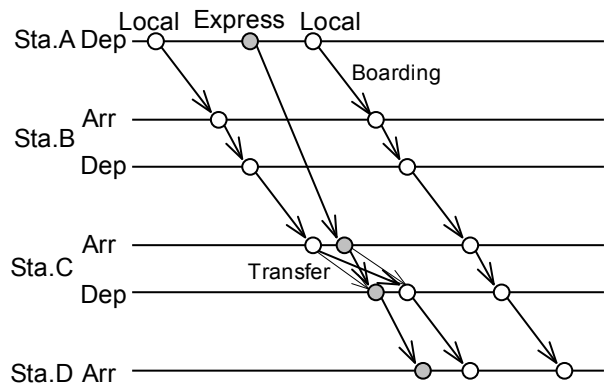


図 3: 乗客行動グラフの例

の路線の情報をよく知っている乗客に対応し、都市鉄道でよく見られるものである。

乗客行動を推定する際にもグラフ構造を用いる。各列車の各停車駅での到着・出発をノードで表し、同一列車のノード間を結ぶリンクにはその走行時間・停車時間を重みとして設定する。異なる列車間を結ぶリンクは、乗換の所要時間と乗換損失の時間換算値を重みとする。

このグラフに対して各駅のノード間の最短経路探索をダイクストラ法を用いて行うことで、損失を最小とする経路を求めることができる。そして経路ごとに OD データから乗客を割り付けることで各列車の乗客数を推定する。乗客行動グラフの例を図 3 に示す。

### 4.3. 乗客の視点に立った整理案の評価

前節で求めた乗客行動推定の結果を用い、個々の乗客が受ける損失の総和を評価値とする。その損失が小さいほどよい整理案とするものである。乗客が受ける損失としては以下の 3 項目を考える。それぞれ次元が異なる量であるので時間換算して取り扱う。

#### 4.3.1. 所要時間

出発駅に着いてから目的駅に到着するまでの所要時間を全ての乗客について求める。その総和を全体の所要時間損失とする。

乗客数  $N$ (人)、乗客  $i$  の所要時間を  $t_i$ (秒)とすると全体の所要時間損失は式(1)で表される。

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

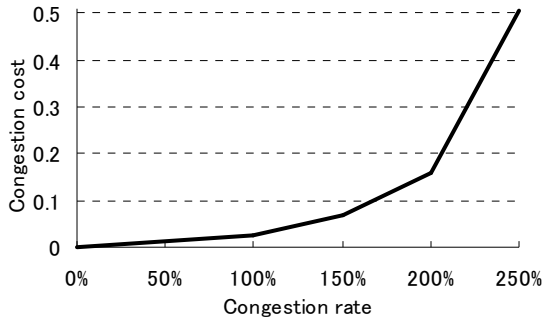


図 4: 混雑に対する人間の感覚を表す係数

### 4.3.2. 乗換

乗換は実際に要する時間以上に乗客に不満を与える要素となるため、その所要時間に加え負担も損失とする。乗換 1 回それぞれの負担の時間換算値を各駅で乗換元・乗換先ホームごとにデータとして与え乗換損失を計算する。

乗客  $i$  の乗換回数  $M_i$ (回)、乗客  $i$  の  $j$  回目の乗換換算値を  $r_{ij}$ (秒)とすると、式(2)で表される。

$$L_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} r_{ij} \dots \dots \dots (2)$$

### 4.3.3. 列車の混雑

列車の混雑により乗客はストレスや疲労を受けするため、これを損失として考慮する。

図 4 に示す混雑時に 1 分につき何分余計に長く感じるかという人間の感覚の非線形性を表した係数<sup>[5]</sup>を用いて混雑度を時間に換算し、その混雑を経験した人数  $q_{is}$ (人)と時間  $t_{is}$ (秒)をかけ求める。駅数  $n$ 、駅  $i$  に到着する列車本数  $S_i$ (本)、駅  $i$  に  $s$  番目に到着する列車の定員  $c_{is}$ (人)、図 4 に示す関数を  $f_c$  とすると式(3)で表される。

$$L_3 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{s=1}^{S_i} f_c \left( \frac{q_{is}}{c_{is}} \right) q_{is} t_{is} \dots \dots \dots (3)$$

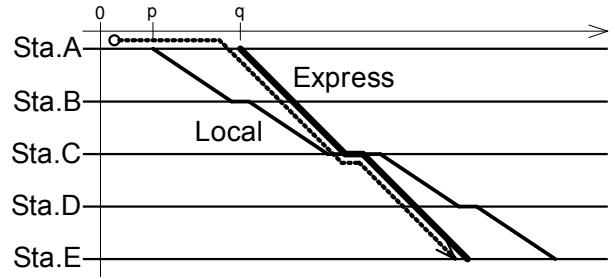
上記 3 種類の損失を合計した、式(4)に示す  $L$ (人・秒) をダイヤの評価値として使用する。

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \dots \dots \dots (4)$$

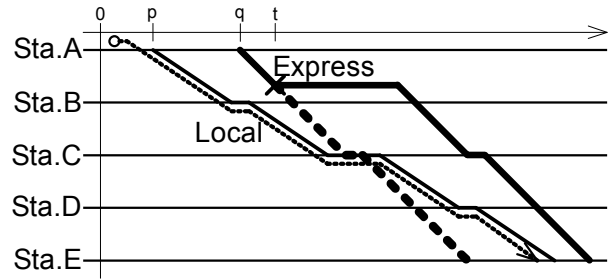
## 5. 列車運転乱れ時の旅客流動推定法

### 5.1. 従来の旅客流動推定法の問題点

先行研究より、障害が発生したと同時に復旧時



(a) 計画ダイヤ



(b) 事故発生後のダイヤ

図 5: 列車運転乱れ時の乗客行動推定の問題点

刻が判明し、瞬時にその後の整理案が作成され、また乗客への情報伝達も障害発生時刻に行われるという仮定をおいている。

しかし、先行研究では障害発生による列車運転乱れ時においても計画ダイヤ時と同じ乗客行動推定法を用いていた。これにより、乗客が障害発生時刻前から障害発生によるダイヤ変更を予見したかのような行動をとってしまう場合がある。

図 5(a)に示す計画ダイヤでは、駅 C で普通列車が急行列車に追い抜かれる。そのため駅 A から駅 E に向かう乗客は、普通列車発車前である時刻 0 ~ p に駅に到着していた場合においても後に出発する急行列車を選択することとなる。

(b)は急行列車に時刻 t で障害が発生し遅延が生じたために、普通列車が駅 C で急行列車の待避を行わないようにダイヤを変更したものである。乗客が事故を知ることができるのは障害発生時刻 t 以降であるため、時刻 p の段階で駅 A にいる乗客は、本来ならば駅 E に先に到着する急行列車を選択することが正しい。

しかし、従来手法では計画ダイヤから障害発生による変更後のダイヤを 1 つのダイヤとして扱い乗客行動グラフを作成していた。そのため、時刻

0の時点で時刻tでの障害発生とその後のダイヤ変更を知っていることとなり、駅Aから駅Eへ向かう乗客は普通列車を選択してしまう。これを現実に即した乗客行動推定方法にする必要がある。

## 5.2. 列車運転乱れ時の旅客流動推定法

列車運転乱れ時における乗客行動を正しくモデル化することは、乗客に障害やダイヤ変更に関する情報がどのように伝わるかを適切に扱うことに帰着される。正常時と障害発生後2つのダイヤを用いることで正しい旅客流動推定を行う。

まず、図6(a)に示す計画ダイヤにおいて障害発生時刻をまたぐ乗客経路とその人数を求める。

次に、(b)に示す障害発生・運転整理適用後ダイヤにおいて障害発生時刻をまたがない乗客経路とその人数を求める。これら障害発生時刻をまたがない乗客は、移動中にダイヤ変更やその情報が伝わることがないために事故予見による問題には関係していない。

ここで、(a)で求めた障害発生時刻に移動中の乗客については、障害発生時刻前と障害発生時に走行中の列車にいる場合には障害発生後最初の停車駅までは新たな経路選択の余地がない。(c)に示す◎のノードまでは計画ダイヤにおける乗客数・経路と同じものとなり、そこから乗客は再経路選択を行う。障害発生時刻に乗客がどこにいたかによってその後の経路作成方法が異なる。

### (1) 走行中の列車内にいた場合

(c)に示す◎の末端着ノードからの最短経路探索を行う。着ノードから探索を行うのは該当駅での乗換も考慮に含めるためである。

### (2) 駅に停車中の列車内にいた場合

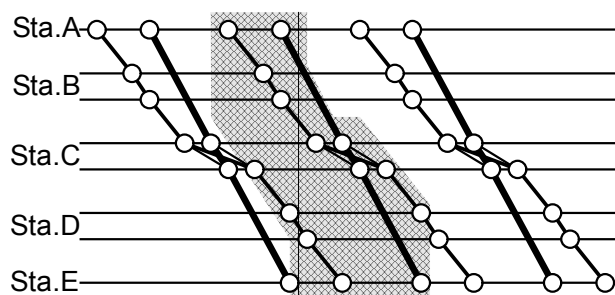
(1)と同様に◎の末端着ノードからの最短経路探索を行う。ただし、この場合は障害発生時刻前のノードから探索することとなり、再探索起点の駅において障害発生前の発ノードを選択してしまうケースがあり得る。そのため、障害発生時刻後の発ノードを通るという条件を加える必要がある。

### (3) 出発駅で列車を待っていた場合

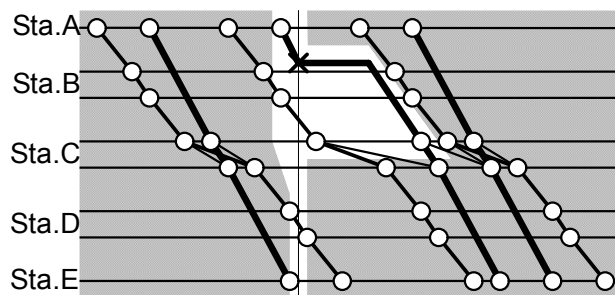
通常時と同様に発ノードからの最短経路探索を行う。

### (4) 乗換で駅にいた場合

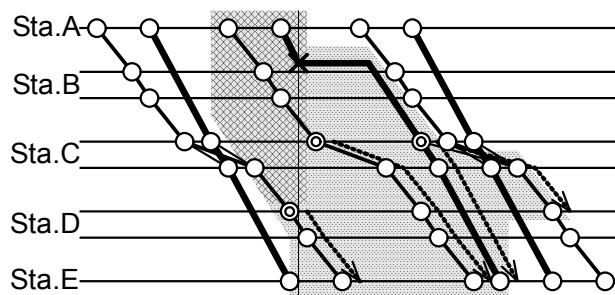
駅に停車中の列車内にいた乗客と同様に扱えばよい。



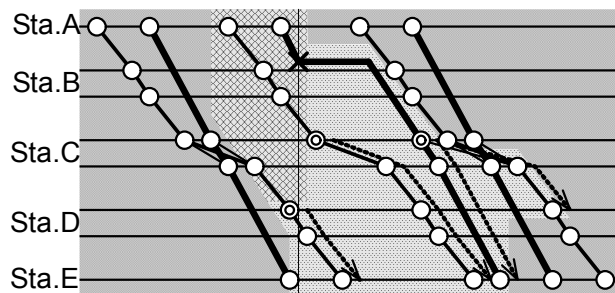
(a) 障害発生時刻をまたぐ乗客経路



(b) 障害発生時刻をまたがない乗客経路



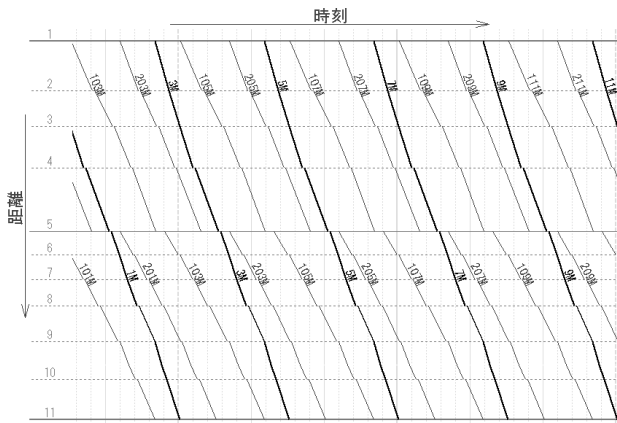
(c) 障害発生後ダイヤにおいて再経路探索



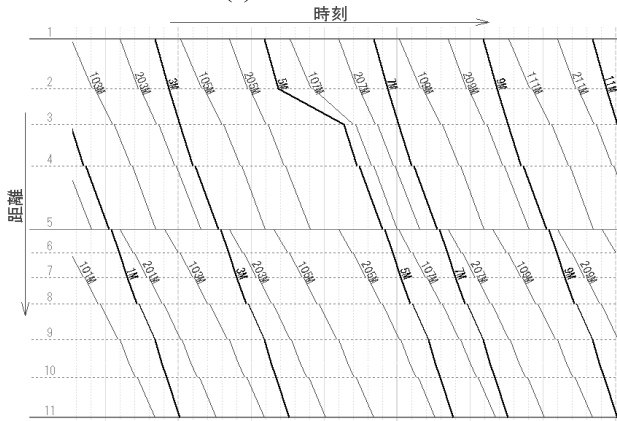
(d) 乗客数の合算

図6: 列車運転乱れ時の乗客行動推定の問題点

このようにして求めた障害発生時刻をまたぐ乗客とまたがない乗客を合算したものが(d)であり、ここから乗客の所要時間・乗換・混雑度を求める。この方法によって正しい評価値を算出することが可能となる。



(a) 計画ダイヤ



(b) 障害発生・運転整理後ダイヤ

図 7: モデル路線のダイヤ

### 5.3. モデル路線を用いた提案手法の検証

図 7(a)に示す計画ダイヤを持つ路線を用い、提案手法の検証を行う。駅 2~3 において急行列車 5M に 450 秒の障害が発生したケースを示したものが図 7(b)である。このとき、駅 5 で普通列車 205M が急行列車 5M の待避を解除している。

計画ダイヤ時、障害発生時における急行列車 5M の乗客数を図 8 に示す。事故を予見する従来からの推定法では、急行列車 5M に乗車すると駅 11 への到着が遅くなるのが障害発生前から分かっていることになるため、乗客が直前の普通列車 205M に移ってしまっている。

今回提案した旅客流動推定法では、障害発生後最初の停車駅である駅 4 までは計画ダイヤと同じ乗客数となる。駅 4~5 は列車間隔が開いたことにより乗客数が増加し、駅 5~11 は普通列車からの乗換がなくなったために乗客数が減少する様子が適切に推定できている。

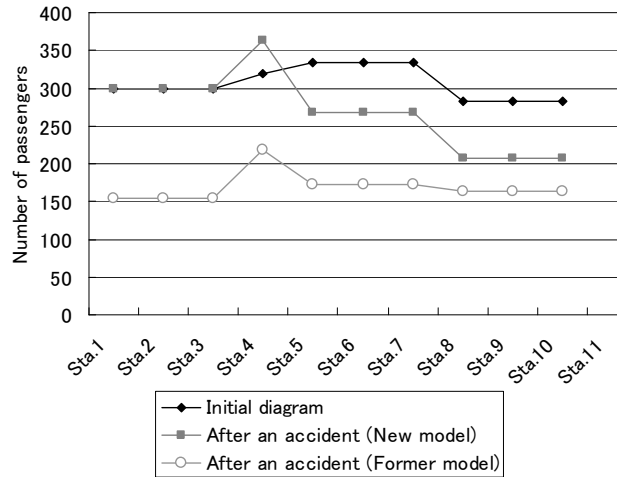


図 8: 急行列車 5M の乗客数

## 6. まとめ

指令員の運転整理業務を支援するためのシステムに乗客流解析に基づく評価を導入する考え方を提案し、障害発生時の正しい旅客流動推定法について詳述した。これにより運転整理時に正しい評価を行うことが可能となる。今後は、障害発生後の運転整理案作成や、乗客への情報伝達に要する時間差を表現する方法の提案・実装を行う。

## 参考文献

- [1] (財)鉄道総合技術研究所 運転システム研究室, 「鉄道のスケジューリングアルゴリズム」, NTS (2005)
- [2] 林良太郎, 古関隆章, 「都市圏鉄道における運転整理案の評価と効率的手法の提案」, 電気学会全国大会, 4-234, pp. 1578-1579 (2001)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] 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)