

# 乗客流推定に基づく運転整理案評価・生成システム

[ 電 ] 高野 求 (東京大学)  
古関 隆章 (東京大学)

## Computer Assisting System to Propose and Evaluate Train-Rescheduling with Estimating Passenger Flow

Motomu Takano (The University of Tokyo)  
Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Presently train dispatchers take on train operation rescheduling when the train operation is disordered by their experience and intuition. Therefore, the authors have proposed a method to evaluate plan of train operation by passengers' loss, and are trying to develop the system assisting dispatchers during rescheduling by proposing a new plan and evaluating it from passengers' point of view. The paper describes the passengers' loss and methods of passengers' behavior simulation and train operation simulation for calculating the loss. The paper also proposes methods for modification of train operation plan based on the result of simulations.

キーワード：運転整理，運行管理

Keywords: train rescheduling, traffic control

### 1. はじめに

現在、運転整理は指令員の勘と経験に基づいて人手で行なわれている。しかし、適切な運転整理を行なうためには線路設備や列車の在線位置などのさまざまな条件を考慮し迅速な判断を下さなければならない。そのため、運転整理業務は指令員にとって大きな負担となっている。

そこで筆者らは、計算機により運転整理案を自動的に提案することにより、運転整理を行なう指令員を支援するシステムの構築を目指している [1]。運転整理案の自動提案を行なうためには、計算機により運転整理案を生成し、また、それを定量的に評価することが必要となる。筆者らは、ダイヤの評価値として乗客の立場から見た指標を導入し、乗客の不満を最小限に抑えるような運転整理を行なうことを目指す。本稿では、ダイヤの評価値である「乗客の損失」と、列車運行・乗客行動シミュレーションによりそれを算出する手法、また、その結果を用いた運転整理案生成手法について述べる。

### 2. 運転整理支援システムの概要

図 1 に運転整理処理の流れを示す。運転整理は、元のダイヤ案に基づき新しいダイヤ案を生成し、それを評価し、評価値に基づいて新しいダイヤ案を棄却または採用するとい

う一連の処理を繰り返しながら評価値を改善する、山登り法や焼きなまし法などの手法により行なわれる。

ダイヤ案の生成は、元のダイヤ案の一部に変更を加えることにより行なわれる。ただし、ここでいうダイヤとは、列車の運転時刻に関する情報は含まず、列車順序や着発線、運転線路等のみを定めたものである。新しいダイヤ案は、元のダイヤ案の列車順序や運転線路などを変更したものとなる。このダイヤに従って列車を運転したときの各列車の運転時刻は、後述の列車運行シミュレーションにより算出される。計算機により自動的にダイヤ案を生成するためにダイヤ案の変更箇所や変更手段を決定する手法については 4 章で述べる。

ダイヤ案の評価は、そのダイヤ案に従って列車を運転したときに、各乗客が出発駅から目的駅に至るまでに被る不効用の総和である「乗客の損失」を指標として行なわれる。ダイヤ案評価の流れを図 2 に示す。乗客の損失を算出するためには、各乗客がどのように列車を選択して乗車するかを知る必要がある。そのため、いくつかの乗客行動モデルを仮定して乗客行動シミュレーションが行なわれる。また、乗客の列車選択は列車の運転時刻に左右されるので、乗客行動シミュレーションに先立って列車運行シミュレーションが行なわれる。これらのシミュレーションや乗客の損失については 3 章で述べる。

なお、本システムは計算機のみにより運転整理案を提案する機能を持つが、図 1 中の新ダイヤ案生成と採否判断を

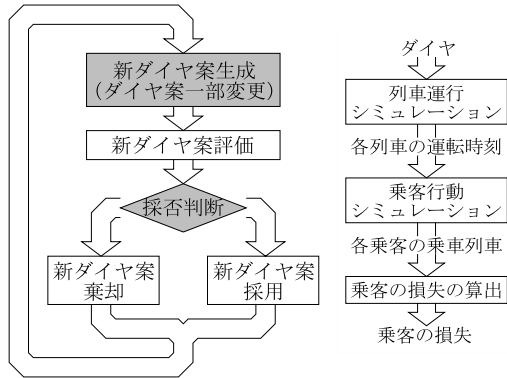


図1 運転整理処理

図2 ダイヤ評価

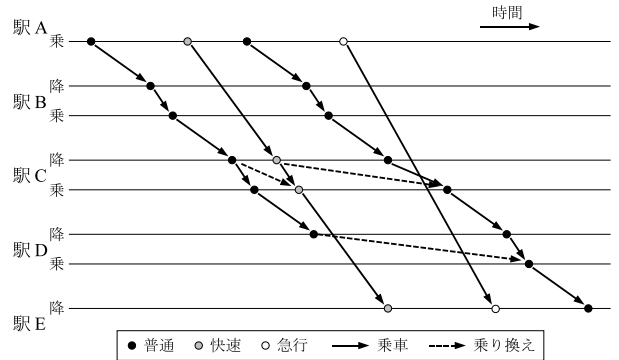


図3 乗客行動シミュレーショングラフの例

指令員の入力により行なうことで、指令員が主体となって運転整理案を作成することもできる。

### 3. 運転整理案の評価

本章では、本システムにおいて運転整理案を定量評価する際に評価尺度として用いる「乗客の損失」と、それを算定する際に必要となる乗客行動及び列車運行のシミュレーションについて述べる。

#### (3.1) 乗客の損失と乗客行動モデル

本システムでは、各乗客が出発駅から目的駅に到達するまでに、以下の3項目によって被る不効用を時間に換算し、全乗客について合計したものを「乗客の損失」と定義して、運転整理案の定量評価に用いる。

- 所要時間
- 乗り換え
- 列車の混雑

乗り換えによる不効用の時間換算値は、各駅の新乗り場ごとに指定される。列車の混雑による不効用は、美谷ら [2] による混雑費用関数を用いて算出する。

上記の損失を算出するためには、各乗客がどのように路線や列車を選択するかを知る必要がある。本システムでは乗客流を推定するため、上記の損失を用いて以下の2つの乗客行動モデルを仮定する。

モデル1 乗客が出発駅に出現する時刻は一樣に分布し、各乗客は目的駅までの所要時間及び乗り換えによる損失が最小となるように路線、列車を選択する。

モデル2 乗客が目的駅に到着すべき時刻は一樣に分布し、各乗客は出発駅からの所要時間及び乗り換えによる損失が最小となるように路線、列車を選択する。

モデル1は時刻表を見ずに駅に来る乗客、モデル2は時刻表を見て乗車する列車を決めてから駅に来る乗客を表す。

#### (3.2) 乗客行動シミュレーション

前節で述べたモデルに従って各乗客が乗車する路線、列車は、グラフを用いて求められる。乗客行動シミュレーション用のグラフの例を図3に示す。このグラフにおけるノードは、各駅における各列車への乗車または列車からの降車を表す。各ノード間の可能な乗客の流れはリンクにより表される。リンクには以下の種類がある。

乗車 1つの列車の乗車・降車ノード間を結び、この列車に乗車している乗客の流れを表す。

乗り換え 乗換元列車の降車ノードと乗換先列車の乗車ノードを結び列車を乗り換える乗客の流れを表す。

リンクには、乗客がそのリンクを通る際に生じる損失を重みとして与える。リンク*i*の所要時間による損失 $t_i$ 、乗り換えによる損失 $r_i$ は以下の式で与えられる。

$$t_i = t_{ei} - t_{si} \quad (1)$$

$$r_i = r(p_{si}, p_{ei}) \quad (2)$$

ここで、 $t_{si}$ 、 $t_{ei}$ はそれぞれ、リンク*i*の始点ノード、終点ノードに対応する乗降の時刻、 $p_{si}$ 、 $p_{ei}$ はそれぞれ、リンク*i*の始点ノード、終点ノードに対応する乗降の乗り場、 $r(p_1, p_2)$ は乗り場 $p_1$ から乗り場 $p_2$ へ乗り換える際の時間換算した不効用である。リンク*i*の重み $w_i$ は次式のように割り当てられる。

$$w_i = \begin{cases} t_i & i \in B \\ t_i + r_i & i \in T \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 $B$ 、 $T$ はそれぞれ乗車リンク、乗り換えリンクの集合である。

このグラフ上で出発駅から目的駅までの最短経路探索を行なうことにより、モデル1に従う各乗客が乗車する路線、列車が求められる。また、リンクの向きを逆にし、目的駅から出発駅までの最短経路探索を行なうと、モデル2の乗客が乗車する路線、列車が求められる。

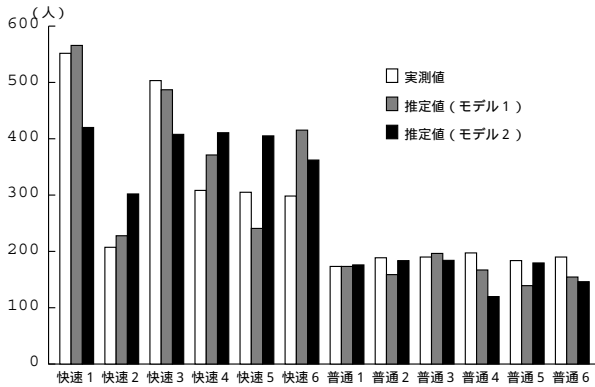


図4 乗車人員の実測値と推定値

### 〈3.3〉 乗客行動グラフと乗客の損失

ダイヤの評価量である乗客の損失は、各リンク上で発生する乗客の損失を合計することにより得られる。乗車リンクにおいては、式(1)の所要時間損失に加えて列車の混雑による損失が発生する。乗車リンク  $i$  上で生じる混雑による損失  $g_i$  は、

$$g_i = g\left(\frac{n_i}{c_i}\right)(t_{ei} - t_{si}) \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 $n_i$  はリンク  $i$  を通る乗客の人数、 $c_i$  はリンク  $i$  の列車の定員、 $g(x)$  は乗車率  $x$  の列車内の乗客が単位時間あたり感じる不効用を時間換算したものである[2]。全体の乗客の損失  $L$  は以下の式で表される。

$$L = \sum_{i \in TUB} n_i t_i + \sum_{i \in T} n_i r_i + \sum_{i \in B} n_i g_i \quad (5)$$

### 〈3.4〉 乗客行動モデルの検証

3.1節で述べた乗客行動モデルの妥当性を検証するため、都市近郊の実路線の平常運転時のデータを用いて乗客行動シミュレーション実験を行なった。

図4は、ある区間における各列車の乗車人員の実測値と2つの乗客モデルによる推定結果を示したものである。列車により推定精度にばらつきがあるが、大まかな傾向はつかめているといえる。今回の実験ではシミュレーションのみで乗客流を推定したが、本システムを実際に運用する際には、車上の重量センサ等の情報を用いてさらに精度を向上することも考えられる。

### 〈3.5〉 列車運行シミュレーション

列車の運行には、駅間の走行に必要な時間など、様々な時間制約がある。安部ら[3]は、PERT(Program Evaluation and Review Technique)により、列車運行シミュレーションを行なった。筆者らもこの手法を用いる。

列車運行シミュレーションに用いられるグラフでは、列車の駅への到着(通過も含む)、駅からの出発(通過も含む)、車両の入換えの開始、終了の各事象はノードにより表される。順序制約のある事象を表すノード間には、先行する事象から後続する事象へ向けてリンクが張られ、事象間に最

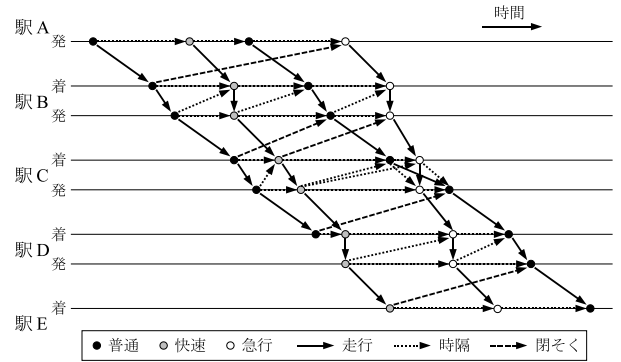


図5 列車運行シミュレーショングラフの例

低限必要な時間間隔がその重みとして割り当てられる。このようなグラフ上で各ノードまでの最長経路探索を行なうことにより、各ノードまでの最大の時間制約を求めることができ、列車が最速で運転した場合の各事象の時刻を知ることができる。

ここで用いられるリンクには以下の種類がある。

- 計画ダイヤ 列車が計画ダイヤより早く運転することを禁止するため、基準時刻を表すノードから列車の着発ノードへ張られる。重みは計画ダイヤ上の運転時刻。
- 走行・停車 列車の駅間の走行、駅での停車、及び車両の入換えによる移動を表す。重みは基準運転時分、停車時分、入換所要時分。
- 時隔 駅構内で進路が競合する列車、車両同士の順序を表す。重みは列車、車両間に必要な時間間隔。
- 閉そく 駅間に同時に走行できる列車数を制限することにより、閉そくシステムによる制約を表す。

列車運行シミュレーショングラフの例を図5に示す。ただし、図5は基準時刻を表すノード及び計画ダイヤを表すリンクを省いて描いてある。

## 4. 運転整理案の生成

本章では、3.2節で述べた乗客行動シミュレーショングラフの情報に基づいてダイヤ案の一部に変更を加え、新たなダイヤ案を生成する手法について、特に列車間接続に着目して述べる。

### (4.1) 乗客行動グラフを用いた損失削減

本システムでは乗客の損失をダイヤの評価量に使い、これを最小化することを目指している。3.3節で述べたように、乗客の損失は乗客行動シミュレーショングラフ上の各リンクから発生していると考えられる。そこで、大きな損失を発生させているリンクを適当に1つ選び(以下これを損失改善対象リンクと呼ぶ)、そのリンクの損失を小さくするようにダイヤに変更を加えることを繰り返すことにより、効果的に全体の損失を低下させることができると考

えられる。3.1 節で述べたように損失には 3 つの種類があるが、ここではそれらのうち所要時間による損失が大きくなっているリンク、すなわち所要時間が長く乗客数も多いリンクを損失改善対象リンクとして扱う。

#### 〈4.2〉 列車運行グラフに基づく運転整理案生成

損失改善対象リンクの損失を小さくするには、リンクの終点となる乗降ノードの遅延が回復するようにダイヤを変更し、リンクの所要時間を短くすればよい。富井ら [4] は、3.5 節で述べた列車運行シミュレーショングラフの基準時刻ノードからある着発ノードまでのクリティカルパス、すなわち最大の時間制約を構成する制約リンクを解消するようにダイヤの変更を行なうことにより、その着発ノードの遅延を回復する手法を提案している。本システムでもこの手法を応用することが可能である。

#### 〈4.3〉 列車間の接続と乗客行動グラフ

損失改善対象リンクが乗換リンクである場合は、列車間の接続を工夫することにより損失を改善できる可能性がある。

単線や複線の一つの路線内の列車間の接続の有無は、各駅における列車順序によって一意に定まる。そこで、3 章で述べたシミュレーション手法を用いて列車順序を最適化することにより接続も最適化することができる。

しかし、異なる路線や複数線区間における異なる系統の線路を運行する列車間には列車順序のような物理的制約が存在しないことが多い。そのため、このような列車間で接続を考慮したシミュレーションを行なうには列車運行グラフに、3.5 節で述べた制約リンクに加え「接続元列車が到着後一定時分経過しなければ接続先列車は出発できない」という制約リンクを導入する必要がある。

前節で述べた手法では、列車運行グラフに接続制約リンクを新たに加えることはできない。そのため、別に接続制約リンクを生成する手法が必要となる。ここでは、損失改善対象リンクが異なる路線や線路を運転する列車間の乗換えであった場合に接続制約リンクを生成する。その例を図 6 に示す。図 6 (a) の乗客行動グラフは、快速列車と普通列車が異なる線路を走行する複数線区間のある接続駅において、快速列車から普通列車への乗換リンクが損失改善対象リンクに選択されている状況を表している。図 6 (b) は、乗換先列車の 1 本前の普通列車を待たせて接続をとった状況を示している。このように、損失改善対象リンクの乗換先列車の 1 本前の同一路線、同一種別の列車と接続をとることにより、損失改善対象リンクをより損失の少ない乗換リンクで置き換えることができる。

しかし、列車を遅らせて接続をとることは、待たされる列車の乗客の所要時間の増加や、列車のその後の運行を混乱させる原因となり、かえって損失を増大させかねないためむやみに行なうべきではない。そこで、以下の条件を満たすときのみ接続制約リンクの生成を試みることにする。

- 乗換える乗客数が一定値以上
- 接続を取らないときの乗換所要時間が一定値以上

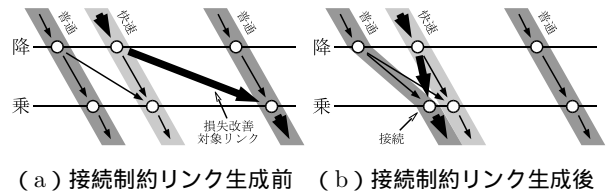


図 6 接続と乗客行動グラフ

- 接続により待たされる列車の乗客数が一定値以下
- 接続により待たされる列車が待たされる時間が一定値以下

また、損失改善対象リンクが乗換リンクであっても、接続を行なうよりも乗換先列車の遅延を回復させたほうが効果的である場合もある。そのため、一定の確率で、本節で述べた接続を行なうか、前節で述べた手法により遅延回復を行なうかを選択する。

#### 〈4.4〉 その他の運転整理手法と乗客行動グラフ

前節では、運転整理案生成に乗客行動シミュレーション結果を有効に利用する手法として、列車間の接続を扱う手法について述べた。乗客行動シミュレーションの結果は、この他にも、列車の運休など乗客流に大きな影響を与えるような運転整理を行なう際のヒントとして利用できると考えられる。これらの手法については今後検討を進めていく予定である。

## 5. おわりに

本稿では、乗客の立場から見たダイヤ評価を行なうための指標である「乗客の損失」と、その算出のためのシミュレーション手法、また、その結果を利用した運転整理案生成手法について述べた。今後は、実路線のデータを用いたシミュレーションによる提案手法の検証、新たな運転整理案生成手法の検討などを行なう。

## 参考文献

- [1] 江口誠, 長崎祐作, 古関隆章: “グラフ理論を適用した運転整理支援システム”, 電気学会研究会資料, 交通・電気鉄道リニアドライブ合同研究会, TER-03-39, LD-03-64, Jul, 2003.
- [2] 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.
- [3] 安部恵介, 荒屋真二: “最長経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, Jan. 1986.
- [4] 富井規雄, 田代善昭, 田部典之, 平井力, 村木国満: “利用者の不満を最小にする列車運転整理アルゴリズム”, 情報処理学会論文誌, 掲載予定.