

利用者デマンドを考慮した 運転整理案作成アルゴリズムの開発

國松 武俊* 平井 力**

A Train Rescheduling Algorithm Using Estimated Passenger Demand

Taketoshi KUNIMATSU Chikara HIRAI

When an accident occurs on a railway line, it is necessary to modify the train schedule to restore the train traffic disruption and to maintain the quality of the transportation service. A sequence of such modifications is called as a train rescheduling. In this paper, we propose a train-rescheduling algorithm using estimated passenger demand. The main flow of the algorithm is based on an existing algorithm with a passenger dissatisfaction index. We have modified the existing algorithm to utilize explicit passenger numbers. In order to estimate those numbers, we employ a simulation technique for train traffic and passenger flow. Applying the algorithm to an actual line, we can confirm that our algorithm can prepare a train-rescheduling plan that reduces passengers' disutility.

キーワード：利用者デマンド，運転整理，アルゴリズム，シミュレーション

1. はじめに

列車ダイヤに乱れが生ずると、輸送サービスの品質をできる限り保つため、列車の運休、順序変更、番線変更等、列車ダイヤに一連の変更が加えられる。これが運転整理¹⁾であり、指令員と呼ばれる担当者を中心に、そのときの運行状況等を総合的に勘案した判断に基づいて実施されている。

特に、大都市圏の線区にダイヤ乱れが生じた場合には、その早期回復を目指すとともに、駅に滞留する旅客、運転再開後の初列車に対する旅客集中、振替輸送手配に伴う旅客数の変化などを考慮し、旅客にとっての利便性をできる限り確保するような運転整理が求められる。旅客、つまり、鉄道利用者の移動に関する要望を「利用者デマンド」と呼ぶことにすれば²⁾、利用者デマンドを考慮した運転整理が求められる、と言い換えることができる。

運転整理の拠点となる指令室では、駅係員、乗務員、関係する現業機関等からの情報に基づき、列車ダイヤの変更、それに伴う車両運用および乗務員運用の変更等に関する判断がなされる。これに従い、関係箇所への伝達、運行管理システムへの入力、乗務員への通告等が行われる。指令は「できる限り良い運転整理」を行うため、列車運行状況および指令員自身の経験に基づいて利用者デマンドを推測し、その時点で最も良いと考えた判断を積

み重ねて運転整理案を作成する。

指令業務を支援するシステムの導入が進められてはいる³⁻⁶⁾が、運転整理の要となる運転整理案作成業務に対する支援、つまり、計算機による運転整理案の作成および提案は、まだ実用化に至っていないとは言い難い。運転整理案作成の難しさは、どのような運転整理が良いのかという評価尺度が定まっていないこと、迅速な作成が要求されること、車両、乗務員等のリソース制約を守る必要があることに起因する。特に、利用者デマンドを考慮した運転整理案を作成するためには、列車ダイヤの変更によって旅客が被る影響を評価することが必要となる。これは、どれだけの旅客がどの列車を選ぶか、また、駅にどれだけの旅客が滞留するか、といった旅客行動を正確に把握、予測することとほぼ同義である。ダイヤ乱れ時の旅客は、他線区へ迂回する等、駅や車内での案内に従って行動が変化するため、旅客自身が被る影響を定量的に評価することは極めて困難である。よって、指令員の経験に基づく評価に従った意思決定がなされているのが現状と言える。

しかしながら、昨今の情報通信技術の発展に伴い、例えば列車無線のデジタル化が実現しており、各列車と指令室の間で、音声通話以外のデータ通信も可能となっている。通告伝達情報、車両故障情報、運行情報が供されるシステムも実用化され⁷⁾、近い将来には、各列車からの旅客に関する情報を指令室に統合することも考えられる。つまり、ダイヤ乱れ時でも、運行管理システムにおいて、各列車の乗車人数等の利用者デマンドを活用でき

* 前 輸送情報技術研究部 (運転システム)

** 輸送情報技術研究部 (運転システム)

特集：輸送情報技術

る可能性があるといえる。

そこで本研究では、将来の運転整理案作成支援を意識し、利用者デマンドに関する情報を活用した運転整理案作成アルゴリズムの開発を目的とする。問題を明らかにするため、列車ダイヤの変更に着目し、乗務員運用の変更は考慮しない。利用者デマンドを考慮した運転整理案を作成するには、旅客の状況を詳細に把握および予測できなければならないが、旅客の一人一人を追従する詳細なシミュレーションの結果を、これらの情報として活用する。このとき、シミュレーションの推定精度が課題となるが、将来的に、現実の利用者デマンドがリアルタイムに取得可能となれば、運転整理案作成の対象となる未来の利用者デマンドを、十分な精度で推定できると考えられる。本研究では、利用者デマンドは、すべて推定した値を用いるが、利用者デマンドを活用した場合の効果を確認することは可能である。

次節では本研究の考え方を述べ、3節では提案アルゴリズムの基盤となる既存研究について記述する。4節で利用者デマンドを考慮した運転整理案作成アルゴリズムを導入し、5節では実在線区を対象とした計算例を示す。6節で本研究のまとめを行う。

2. アルゴリズム構築へのアプローチ

2.1 ダイヤ乱れ時の旅客行動モデル

平常時において、どの列車にどれほどの旅客が乗車するのか、各旅客はどの列車を利用、乗り継いで目的駅へ向かうのかを推定する手法は、最短路探索のDijkstra法を利用したものを中心に、これまでも提案されている⁸⁾。しかし、ダイヤ乱れ時には、他路線への迂回行動等、旅客のとり行動パターンは大きく異なるものとなる。また、旅客集中に伴って遅延が発生し、その遅延が更に旅客集中を引き起こすといった、増延と呼ばれる現象も発生し得る。上記の手法では、これらの現象はモデルに組み込まれてはいない。

ダイヤ乱れ時を対象とする場合には、これらの状況を踏まえた旅客行動モデルを構築し、それに基づいた旅客行動の推定を行う必要がある。

2.2 運転整理案評価の考え方

鉄道事業者では、運転整理案の評価尺度として、総遅延時分、運休列車の本数、正常運行に戻るまでの時間等を目安にしていることが多い。利用者の利便性による運転整理案の評価手法⁹⁾も提案されているが、具体的に算出するためには、基礎となるダイヤ乱れ時の旅客一人一人の行動を、精緻に把握する必要がある。旅客の観点からダイヤ乱れの規模を測る尺度¹⁰⁾を導入している例もあるが、個別のダイヤ変更の影響を測ることまでは想定

されていない。

運転整理案の評価を考える場合、極端な考え方としてはダイヤ乱れの影響を被ったすべての旅客の意見を収集するということになるが、それは不可能である。実際に算出可能とするためには、適切なモデルに基づくシミュレーションを実施することが考えられる。

2.3 従来の運転整理案作成アルゴリズム

運転整理案を計算機で作成する研究の1つとして、新幹線を対象とした例がある¹¹⁾。これは制約プログラミングによるアプローチが採られており、解を効率的に探索できるが、利用者デマンドを明示的に組み込んだものではない。

在来線を対象とし、旅客を意識した研究として、利用者の不満を最小にする運転整理案作成アルゴリズムが提案されている¹²⁾。ただし、このアルゴリズムでは旅客行動を陽に扱ってはならず、旅客が不満を感じる箇所がわかっても、どれだけの旅客がその影響を被るかは考慮されていない。

また、ダイヤ図上のエリア毎に旅客数を推定し、それに対して適切な運転本数となるように列車数を調整する手法も提案されている¹³⁾。しかし、ダイヤ乱れ時の個々の旅客の動向を詳細に推定したものはなっておらず、運転整理案の評価も旅客数だけに着目したもので、各旅客が体験した混雑、待ち時間、乗換等は反映されていない。

2.4 運転整理案作成アルゴリズムの要件

本研究では、次を要件とする運転整理案作成アルゴリズムの構築を目標とする。

- (1) ダイヤ乱れ時における旅客一人一人の行動を把握し、それを活用すること
- (2) 旅客一人一人の体験に基づく運転整理案評価をすること
- (3) 上記による旅客行動、旅客の観点による評価を反映させた運転整理案を作成すること

これらの要件を満たしたアルゴリズムとするため、図1の枠組を提案する。ダイヤ乱れ時に迂回経路を選ぶ旅客を予測する「迂回予測」、ダイヤ乱れ時の旅客行動を予測し、旅客の視点から運転整理案の評価を行う「列車運行・旅客行動推定」、算出された運転整理案の評価値、推定された旅客行動から、運転整理案の修正、改良を行う「運転整理案作成」の各機能から構成される。なお、以降、列車運行・旅客行動推定の機能を、単にシミュレータとも呼ぶ。

以下、図1に示した枠組の動作を示す。

- (1) 運転整理案作成の対象となる輸送障害のシナリオ（発生時刻、不通区間、復旧見込時刻、迂回の有無）に対し、運転整理を実施しなかった場合の乱れダイ

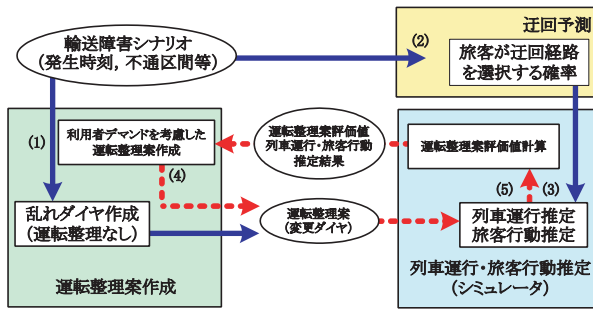


図1 提案する運転整理案作成アルゴリズムの枠組

- ヤを作成する。
- (2) シナリオに基づき、迂回予測により、時刻、発駅、目的駅の組合せ別に、他路線へ迂回する旅客の行動を予測する。
 - (3) 迂回行動を考慮した旅客データをシミュレータに入力し、乱れダイヤでの旅客行動を推定し、乱れダイヤに対する評価値を計算する。
 - (4) 旅客行動推定結果および評価値に基づき、運転整理案作成システムで、新たな運転整理案を作成する。
 - (5) 作成された運転整理案と利用者データから旅客行動を推定し、評価値を計算する。
 - (6) 以下、(4)と(5)を反復する。予め定めた回数を超えたところで終了し、それまでに得られた最良の運転整理案を出力する。

次節では、この枠組を実装するための要素技術について述べる。

3. 提案アルゴリズムで活用する既存研究

3.1 運転整理案作成

運転整理案作成では、利用者の不満を最小とする運転整理案作成アルゴリズム¹²⁾をベースとした計算を行う。運転整理案から旅客が不満を感じると考えられる、列車の遅延、停車時分の増大、駅間走行時分の増大、運転頻度の低下、接続時間が大きくなる箇所を抽出し、これらの中から1つを確率的に選択して修正するという手順を反復し、最終的に不満の箇所数を最小にする案を採択するというものである。このアルゴリズムは、不満箇所を高速に探索して改良を行えるという利点があるが、旅客行動が陽には考慮されず、各不満箇所がどれほどの旅客に影響を与えているのかは考慮されない。また、旅客の乗降による列車遅延拡大も組み込まれてはいない。旅客の観点から好ましい案を作成するためには、旅客行動を陽に扱うことが望ましい。

3.2 迂回予測

図1の迂回予測では、ダイヤ乱れ時の実態に近い旅客

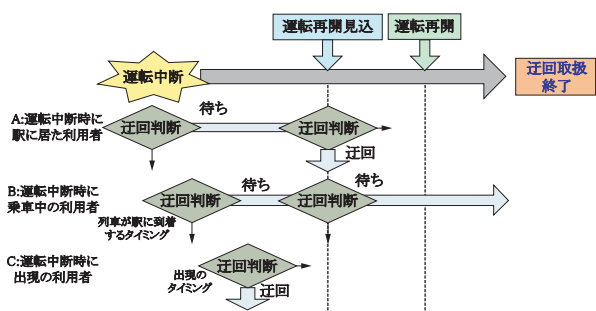


図2 他路線への迂回行動の判断タイミング

行動を把握するため、他路線への旅客の迂回行動を予測する。輸送障害発生時に旅客が「待つ」か「迂回する」かの経路選択問題を表現するモデル¹⁴⁾から、与えられた運転再開までの時間に基づいて迂回経路を選択する確率を予測する手法を活用する。これにより、輸送障害のシナリオに沿った形で迂回経路にまわる旅客数を予測できる。

具体的には、図2に示すように、運転中断時も含め、何らかの情報が与えられた時刻に迂回判断を行う。この判断が行われるのは、運転見合わせが認知された時刻、運転再開見込が案内された時刻、運転再開時刻、迂回乗車の取扱を終了した時刻である。したがって、迂回判断は、1人の旅客に対して複数回行われることもある。なお、一度迂回経路を選択した旅客に対しては、再度の判断は行わない。この判断に必要な旅客の所要時間推定には、上記の各判断のタイミングに着目した関数¹⁵⁾を用いる。

3.3 列車運行・旅客行動推定

列車運行・旅客行動推定においては、列車運行・旅客行動シミュレータ¹⁶⁾として構築したシステムを活用する。自動改札機等から収集されたOD (Origin Destination) データをもとに、旅客一人一人の乗車駅から降車駅までの利用列車、乗継を推定する。また、推定された各旅客の行動から、各列車の乗車人数、各駅での乗降人数を算出する。更に、推定された各駅での乗降人数および列車乗車人数から、乗降に必要な時間を算出し、乗降に起因する列車の遅延を推定する。これは2.1節で述べた増延を表す。これらを時系列的に逐次計算することで、旅客一人一人の行動をトレースした推定が可能となる。

3.4 運転整理案評価

運転整理案の評価にあたっては、2.2節を踏まえ、旅客の観点による評価を行う。具体的には、3.2節の迂回予測手法の適用後、当該路線に残った旅客について、ある運転整理案を実施した場合の行動(利用列車、乗継)を推定し、その行動に対して図3に示す不効用値を評価値と

特集：輸送情報技術

$$\begin{aligned} \text{不効用値} &= \text{列車乗車時間 (秒)} \\ &+ 2 \times \text{ホーム待ち時間 (秒)} \\ &+ 600 \times \text{乗換回数} \\ &+ \sum (\text{駅間走行時間 (秒)} \times \text{混雑度式}) \end{aligned}$$

※混雑度式

- ・混雑率0～100% : $0.027 \times (\text{混雑率}[\%] / 100)$
- ・混雑率100～150% : $0.0828 \times (\text{混雑率}[\%] / 100) - 0.0558$
- ・混雑率150～200% : $0.179 \times (\text{混雑率}[\%] / 100) - 0.2$
- ・混雑率200～250% : $0.69 \times (\text{混雑率}[\%] / 100) - 1.22$
- ・混雑率250以上 : $1.15 \times (\text{混雑率}[\%] / 100) - 2.37$

図3 「不効用値」の計算式

して算出する。これは、国土交通省が監修するマニュアル¹⁷⁾に記載されている費用便益分析の一部を、時間換算で算出する形にしたものである。

全旅客の不効用値を平均した値を、その運転整理案に対する評価値とする。これにより、各旅客の体験に基づく評価を積み上げた、より旅客の実感に近い運転整理案の評価値になると考えられる。

4. 運転整理案作成アルゴリズム

利用者デマンドを考慮した運転整理案作成アルゴリズムを、図1で示した枠組に従って導入する。

利用者の不満を最小とする運転整理案作成アルゴリズム¹²⁾をベースに、旅客行動、および旅客の観点による評価を活用するアルゴリズムを構築する。以降、利用者の不満を最小とする運転整理案作成アルゴリズムを、既存アルゴリズムとも呼ぶ。

図4に、図1において点線矢印で示した部分の詳細を示す。

(1) 乗車人数・乗降する人数の取得

旅客行動推定結果より、各列車、区間の乗車人数、各駅での乗降人数を記録し、これを各不満箇所での「深刻度」として利用する。

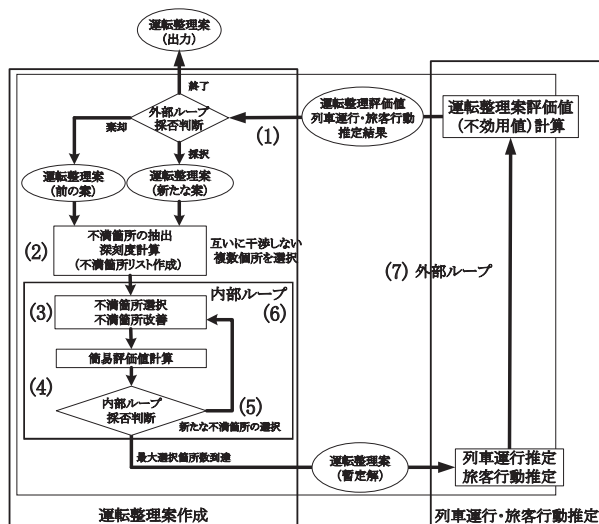


図4 運転整理案作成システムの詳細

(2) 不満箇所の抽出

シミュレーション後の運転整理案、旅客行動に対し、旅客が不満を感じる箇所を抽出し、列挙することで「不満箇所リスト」を作成する。抽出対象は、旅客行動を反映した下記のものとする。

- (a) 着／発時刻の遅れが一定値以上の列車と区間
- (b) 列車間隔が大きい駅と時間帯
- (c) 駅間走行時分が一定値以上の列車と区間
- (d) 列車混雑度が一定値以上の列車と区間
- (e) 駅ホーム混雑度が一定値以上の列車と区間

これらの各不満について、それにより影響を受ける人数を、旅客行動推定結果より算出し、各不満の「深刻度」を計算する。深刻度の計算方法は、a, c, dは、列車乗車人数に予め設定した不満の種類毎の倍率を乗じたものとし、b, eは、その時点での駅ホーム滞留人数に種類毎の倍率を乗じたものとする。

(3) 不満箇所の選択・改善

全不満箇所の深刻度の総和で、各不満箇所の深刻度を正規化して確率の形にし、全不満の中から1つを確率的に選択する。こうすることで、深刻度の大きい不満箇所が選択されやすくなる。選択した不満箇所を改善するように、既存アルゴリズムの手続きに従って変更する。そして、作成した運転整理案が実施可能か否かチェックをする。ここで実施不可能な場合には、その変更を破棄する。

(4) 簡易評価値計算・採否判断 (内側ループ)

変更前の案と変更後の案に対し、「不満の指数」を計算する。不満の指数は、(2)のa～cに該当する箇所の個数(件数)とする。これを、運転整理案の「簡易評価値」と考え、案変更前後で不満の指数が良くなったかどうかを判定し、変更の採否を判断する。不満の指数が良くなった場合には、必ずその変更を採用し、不満の指数が悪くなった場合には、ある確率で採用する。この確率は、全体の開始直後は低い確率に設定し、反復回数が増すにつれて、採用確率を高くする。これは、メタ戦略の1つであるシミュレーテッド・アニーリング¹⁸⁾とは逆の考え方であり、開始直後は厳しく判定することで、真に改善となる整理案修正のみを積極的に採用し、効率的な探索を進める一方、後半では、改悪となる修正も採用し、シミュレータを用いた旅客の観点による評価に委ねる、というものである。

旅客の観点評価値による解の採否(外部ループ)については後述するが、内側のループと外側のループで異なる考え方を利用することで、全体として効率の良い解探索を期待するものである。この採否判断の結果、採用修正個数が規定数に達したなら(7)へ、達していなければ(5)へ進む。

(5) 新たな不満箇所の選択

(2)で抽出した不満のうち、(3)で改善を実施したも

の、および、干渉の可能性があるものを改善すべき不満箇所リストから削除する。ここで、干渉の可能性があるものとは、既存アルゴリズムにおいて、(3)の改善を実施した不満箇所に関する列車が、他の駅で引き起こし得る不満箇所が相当する。これは、前に行った改善により旅客行動が変動し、仮に変動の影響がある箇所を改善する場合、保持している旅客行動推定結果は、実態と異なるためである。そして、残った不満箇所に対し、確率を再度正規化し、次の不満箇所を選択する。

このように、1度のシミュレーション(外部ループ)で複数箇所を修正することで、時間を要するシミュレーション計算の回数を抑えることを狙う。

(6) 内部ループの反復

以降、(3)、(4)、(5)を、最大選択箇所数に達するまで繰り返す。ここで、内部ループで一度に選択する改善箇所数は、最初は多め(駅数÷2)からスタートし、徐々に減らし、最後は1つになる。このように、後半において、内部ループで一度に修正する数を少なめにし、外部ループのシミュレーションの実施頻度を徐々に大きくすることで、より精緻な旅客の観点からの評価値による判定を行う。

(7) シミュレーションと外部ループの採否判断

これらの処理により作成された、新たな運転整理案に対し、シミュレータによる旅客行動推定、旅客の観点による評価を行う(外部ループ)。この結果に対し、さらに解の採否判断を行う。この外部ループの採否判断は、シミュレータが算出する評価値(不効用値の平均)に基づいて行われ、通常のシミュレーティッド・アニーリングを用いる。ここで、採否判断で棄却された場合には、その前の内部ループで実施した複数の改善全てを棄却し、外部ループの実施前の案に戻して継続する。

以降、(1)～(7)を反復し、外部ループの解の評価値が収束半径内に収まるか、一定回数以上反復した時点で最良の運転整理案を出力する。

5. 実験結果と評価

5.1 路線の概要とダイヤ乱れのシナリオ

大都市圏のある路線を対象に、本アルゴリズムを適用し、次のシナリオのダイヤ乱れを想定したケーススタディを実施した。この路線の概要を図5に示す。

- 18:14 E駅～F駅間で事故発生→抑止手配開始
- 18:20 抑止手配完了。旅客に全線運転見合わせ、迂回乗車・振替輸送実施の案内。この後、当該路線内にいる旅客、駅に現れた旅客は皆、迂回経路を認知し19:00に運転再開と自己予測
- 18:40 「全線での運転再開見込み時刻は18:50」とアナウ

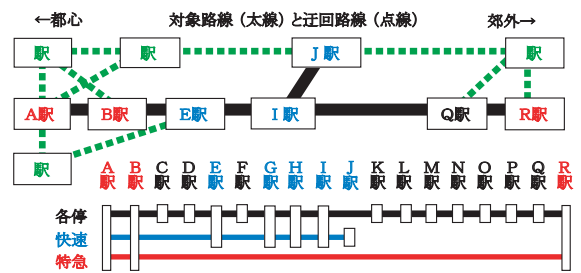


図5 対象路線の路線図と種別停車駅

ンス開始。当該列車から順次運転再開。

18:50 全列車で運転を再開。この間、迂回乗車・振替輸送は継続

20:10 迂回乗車・振替輸送の終了

一方、迂回経路の推定は、図5の路線図で、他線に迂回できる駅相互間の利用者のみを対象に行う。具体的には、A, B, E, J, Q, R 駅相互の利用者である。

5.2 運転整理案作成結果

提案アルゴリズムを利用し、前節のシナリオに対して運転整理案作成の実験を行った。迂回経路への流出量も考慮することにより、ダイヤ乱れ時の旅客行動の実態を反映した、より適切な運転整理案が作成されることが期待できる。

提案アルゴリズムが作成した整理案の一部を図6(a)に示す。比較のため、既存アルゴリズムによる整理案を図6(b)に示す。後者は運転再開後のダイヤ回復までの時間が短い一方、運転再開直後においても積極的に列車の順序変更(各停と快速、特急など)等が行われている。これは、既存アルゴリズムが、ダイヤの早期回復に重点を置いて運休、順序変更を積極的に行ったのに対し、提案アルゴリズムは、運転再開直後の列車の混雑率が高いことを重視し、再開直後の利用者不効用を抑えるように順序変更を極力避けたため、と考えられる。一方、図の範囲外になるが、提案アルゴリズムでも、再開後の時間が経過すると、部分運休、順序変更を積極的に行っている。再開後も利用者の迂回経路への流出が発生しているため、列車本数に比して利用者数が少なく、輸送力確保よりもダイヤの早期回復に主眼を置いたためと理解できる。

図7に、提案アルゴリズムの反復回数と、3.3節で示し

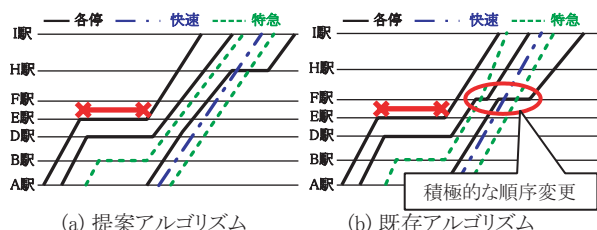


図6 運転整理ダイヤ図

特集：輸送情報技術

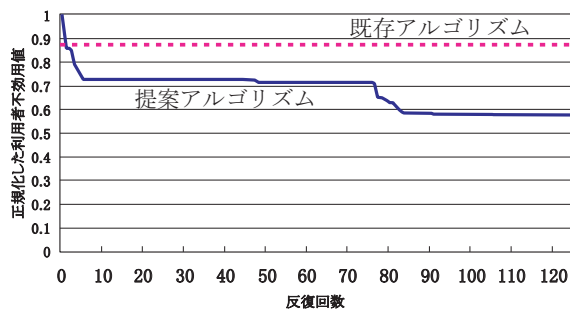


図7 反復回数と解の評価値の推移

た不効用値の推移、また、既存アルゴリズムによる評価値を示す。なお、乱れなしのときの評価値をゼロ、運転整理なしのときの評価値を1として正規化している。提案アルゴリズムにより、案が段階的に改良されていくことがわかる。また、提案アルゴリズムにより最終的に作成される案が、既存アルゴリズムの案に比べ、利用者の観点から良いものになっている。

6. まとめ

本研究では、利用者デマンドを考慮した運転整理案作成アルゴリズムを提案した。鉄道の輸送障害発生時における運転整理案の評価、作成について、旅客の他経路への迂回など、より実態に近い旅客行動を推定し、それに基づいた運転整理案評価および自動作成を行うものである。実在の通勤線区を対象とした計算実験を行い、利用者デマンドを陽に活用することで、旅客の観点から望ましい運転整理案を作成できることを確認した。

直前の利用者デマンドまで取得できたとしても、運転整理案作成の対象となる未来の利用者デマンドを推定するためには、一般に計算時間を要する。運転整理案作成は短時間内に作成する必要があるため、迅速な利用者デマンド推定手法が求められる。しかし、運転整理方針の事前検討への活用を考えるならば、計算時間を要しても、より良い運転整理案を作成するアルゴリズムが望ましい。

文 献

1) 富井規雄:列車ダイヤのひみつー一定時運行のしくみー, 成山堂書店, 2005
 2) 富井規雄, 小野耕司, 後藤浩一, 福村直登, 土屋隆司: デマンド輸送実現のための課題, 鉄道総研報告, Vol.17,

No.12, pp.1-6, 2003

3) 有澤太一: JR東日本 ATOS 導入のあらまし, 鉄道ピクトリアル, Vol.57, No.9, pp.52-57, 2007
 4) 中村達也, 井原恭平: 運行管理システムの現状と課題, 電気学会誌 Vol.124, No.5, pp.279-283, 2004
 5) 井上貴芳, 松下晃治, 小林聡: 運転通告伝送システムの開発. 電気学会研究会資料 TER-08-47, 2008
 6) 村上誠, 古川正浩: 複数指令と情報共有を図った新しい支線区指令システムの開発, 第44回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号401, 2007
 7) 早野秀昭, 大森均, 厚澤誠: 在来線デジタル列車無線システムの開発. JR East R&D Report 79, pp.12-15, 2008
 8) 長崎祐作, 明日香昌, 駒谷喜代俊: 鉄道における乗客流推定方式の高速化, 電気学会論文誌C Vol.126, No.11, pp.1406-1413, 2006
 9) 小林里紗, 家田仁, 柴崎隆一, 寺部慎太郎: 「利用者の利便性から見た非常時の運転整理ダイヤの評価」, 第7回鉄道連合シンポジウム, pp.379-382, 2000
 10) 館雅憲, 福山浩史: 輸送安定度使用「POINT」の開発と全社展開」, 第44回サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号101, 2007
 11) 清水宏之, 野末尚次: 新しい計画技術と鉄道運行管理ー制約プログラミングを用いた新幹線運転整理システムー, 平成14年電気学会産業応用部門大会講演論文集2, S7-4, pp.831-836, 2002
 12) 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: 数理モデル化と応用, Vol.46, No.SIG 2 (TOM11), pp.26-38, 2005
 13) 井上健造, 有澤太一, 相馬真, 辺田文彦: 運転整理システムの開発, JR EAST Technical Review, No.20, pp.59-61, 2007
 14) 武藤雅威: 運転再開時における旅客数の予測手法の開発, 鉄道総研報告, Vol. 22, No.6, pp.17-22, 2008
 15) 土屋隆司, 山内香奈, 杉山陽一, 藤浪浩平, 有澤理一郎, 中川剛志: 列車ダイヤ乱れ時における経路選択支援システムとその利用者行動への影響把握, FIT2006 情報科学技術レターズ, LO-005, 2006
 16) 國松武俊, 平井力, 富井規雄: 「列車運行・旅客行動シミュレータの構築」, 第13回鉄道連合シンポジウム, J-Rail 2006, pp.347-350, 2006
 17) 国土交通省鉄道局監修: 鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル2005, 財団法人運輸政策研究機構, 2005
 18) 柳浦睦憲, 茨木俊秀: 組み合わせ最適化ーメタ戦略を中心としてー, 朝倉書店, 2000