

複々線区間における折り返しを考慮した列車運行シミュレーションと 乗客流解析

福地 正樹* 古関 隆章 (東京大学大学院)

Operational Simulation and Passenger-Flow Analysis of an Urban Rail-Guided Public Transportation on a Quadruple Track

Masaki Fukuchi* and Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

On a quadruple track, intentional abandon of a train operation and changes of used track can be effective measures for the recovery of regular operation from a relatively large operation disorder. For a systematic evaluation of the model and rescheduling optimization, fast passenger-flow analysis based on a rational model is significant. The authors propose to assume and to combine passenger-flow on two paths: The passenger flows divided into two paths based on a stochastic logit model, which gives an appropriate evaluation of the passengers' disadvantage criteria appropriate from both plausibility and light computational load.

キーワード：列車運行, 乗客流解析, ロジットモデル, 運転整理, スケジューリング
(train operation, passenger-flow analysis, logit model, train dispatch, scheduling)

1. はじめに

運転整理と呼ばれる列車ダイヤの乱れを元に戻す作業は、指令員の重要な仕事の1つである。その作業は、現在の彼らの経験と勘に基づいており、車両性能、列車位置、客の要望などを勘案する必要があり、とても難しいものとなっている。よって、高速、高密度の都市部の鉄道において、コンピュータによる運転整理支援が求められている。

我々は、複々線区間における運転整理支援システムを提案する。複々線区間においては、大規模乱れに対して、運休だけではなく、運転線路変更という運転整理の手段もありうる。どのような運転整理を行うか決定する時、ダイヤ案の系統的な評価が必要である。その評価においては、乗客の行動を推定することは重要であり、モデルに基づき速い解析が必要である。

本論文においては、乗客流動について、現実に即していると思われる2つの行動を仮定する。その仮定に基づいて乗客流解析を行い、結果を示す。また、乗客流解析にかかる計算時間が、MPSアルゴリズムを用いたものと比べて遜色なく、適切な時間で計算していることを示す。

2. システムの概要

本運転整理支援システムは、先行研究⁽¹⁾に基づき、列車ダイヤ案を作成し、そのダイヤ案を評価し、評価値が小さい

ダイヤ案を採用する。列車ダイヤ案を作成する部分では、列車の走行する線路や列車の出発、到着時刻が決定される。ダイヤ案を評価する部分においては、乗客の行動を推定し、評価値が計算される。ダイヤ案は、評価値に基づいて判断され、ダイヤの作成と評価が繰り返されるようになっている。そして、指令員に運転整理案が提示される。図1にコンピュータによる運転整理支援システムの構成を示す。

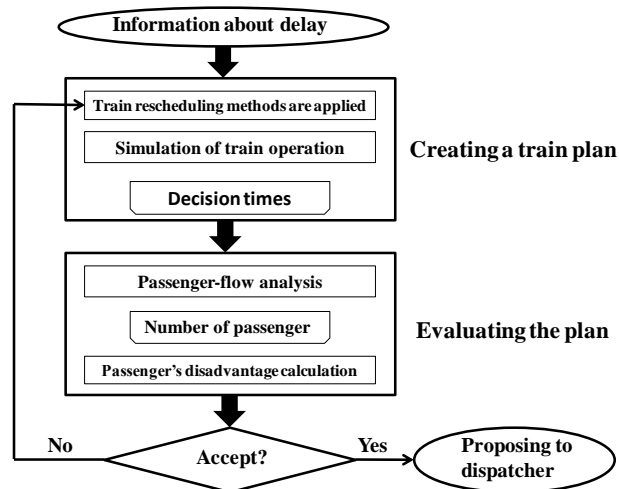


図1 システムの構成

Fig.1 A composition of the train rescheduling system

3. 運行シミュレーション

列車ダイヤ案を作成する部分では、さらに、運転整理を適用する部分と列車の運行をシミュレーションする部分に分けることができる。今回、運転整理については実際に行っていないので、運行シミュレーションについて紹介する。

〈3.1〉 列車運行の制約条件

列車運行には様々な制約が存在する。列車運行シミュレーションでは、全ての厳しい条件を満たす到着や発車の時刻を決定する必要がある。今回、先行研究²⁾に基づき、列車運行を表すのにグラフ理論を用いる。ノードは、各列車の到着や発車を表し、リンクは以下で表すような規制を表す。

〈3.1.1〉 計画時刻

列車の運行は、予め計画されたダイヤ通りに運行することが基本である。この制約では、決められたダイヤより早発したり早着したりしないようにするための制約である。リンクの始端は時刻 0 で、リンクの重みは計画時刻である。

〈3.1.2〉 駅間所要時間

特急や急行、普通等列車種別及び車両の走行性能毎に駅間の最低限かかる走行時間が予め決められている。リンクの重みは、最低限かかる走行時間である。

〈3.1.3〉 停車時間

乗客の乗降のためにはある程度の停車時間が必要である。リンクの重みは、その駅に停車しなければならない最小停車時間である。ただし、列車が通過するとき、リンクの重みは 0 である。

〈3.1.4〉 進路支障

進路を支障されている状態では列車の運行が不可能である。リンクの重みは、進路が支障されている時間である。

〈3.1.5〉 閉塞

鉄道等の専用軌道を守る公共交通においては、前方列車との衝突を避けるために、信号システムを導入している。信号システムにより、駅間で走れる列車の本数は制限される。リンクの始点は、到着ノードであり、ノードの終点は制限された本数後の列車の前駅出発ノードである。リンクの重みは 0 である。

〈3.2〉 列車運行シミュレーション

時刻の起源となるノードから到着及び発車時刻を表現している各ノードへ最長経路探索することにより、経路の長さで列車の発着時刻を表すことは可能である。また、リンクにより運転整理時に重要な手掛かりとなるクリティカルパスを得ることができる。最長経路探索には PERT 法を用いる。運転整理を適用する時には適切にノードとリンクの

情報を変える必要がある。図 2 に列車運行シミュレーションの例を示す。

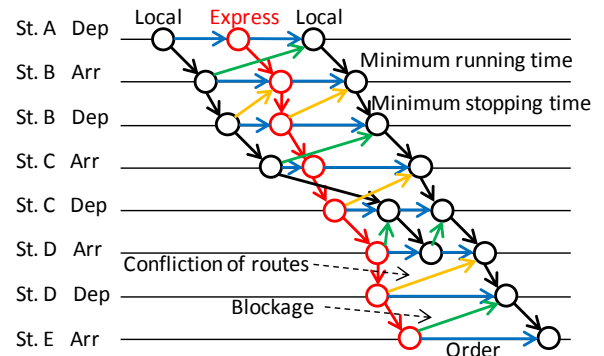


図 2 運行シミュレーション

fig.2 An example of a graph representing train operation

〈3.3〉 遅れ時の列車運行シミュレーション

事故を表現するには、該当列車の事故発生箇所において、計画時刻のリンクを遅れの分だけ足し合わせた重みにすればよい。今回、モデル路線について 30 分の遅れを模擬し、その後、特に運転整理を行わなかった場合のダイヤのシミュレーション結果を図 3 に示す。遅れの個所には、×を記してある。また、点線は計画ダイヤを表している。

4. ダイヤの評価

従来、実用においては、列車の遅延時間の合計で運転整理のダイヤ案が評価されていた。しかしながら、評価値を下げるために運休をすることによって、運休した列車に乗ろうとしていた客が、ホームにあふれることは考えられる。そのような事態を避けるために、乗客の感じる損失で列車ダイヤを評価することが提案されている⁽¹⁾。本章では、乗客の感じる損失についての定義を示す。また、乗客流解析の時に、どのように乗客の行動を仮定し、どのように解析・評価を行うのかを示す。

〈4.1〉 評価値の定義

評価値は、各損失の線形和で表される。損失及び評価値の単位は[人・秒]である。Lは評価値、L₁は所要時間による損失、L₂は混雑による損失、L₃はその他の損失を表す。

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (1)$$

〈4.1.1〉 所要時間による損失

乗客が駅に着いてから目的の駅に到着するまでの時間を表し、駅での待ち時間も含まれる。

$$L_1 = \sum_{i=1}^N t_i \quad (2)$$

ただし、Nは全体の乗客数、t_iは乗客iの所要時間を表す。

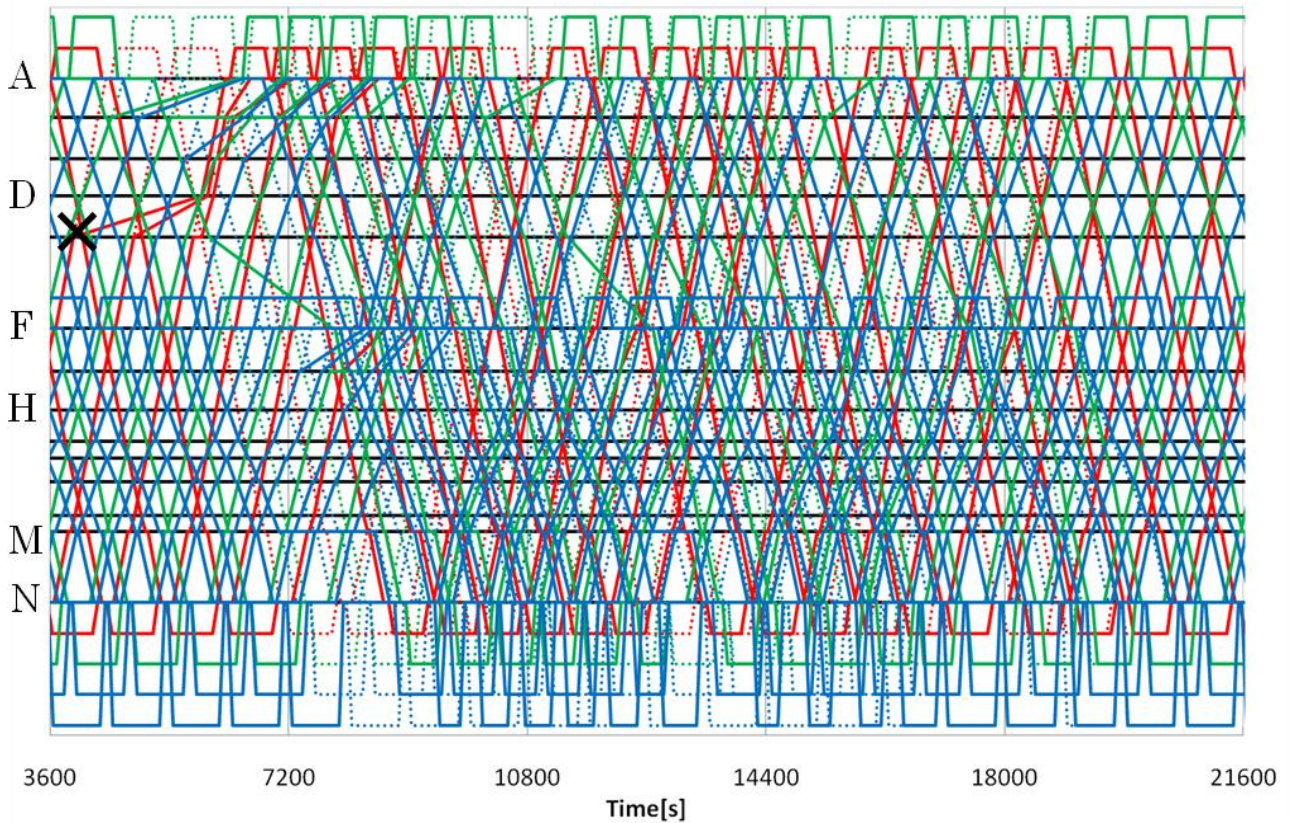


図3 事故時の運行シミュレーション結果
Fig.3 Simulation of train operation in accident

〈4.1.2〉 混雑による損失

混雑した列車に乗車すると乗客は不快に感じる。これを時間換算の損失として表す。

$$L_2 = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=1}^{S_k} f_c \left(\frac{q_{ks}}{C_{ks}} \right) q_{ks} t_{ks} \quad (3)$$

ただし、 n は駅数、 S_k は駅 k に到着する列車本数、 f_c は図4に表す係数⁽⁹⁾、 C_{ks} は駅 k に s 番目に到着する列車の定員、 q_{ks} は駅 k に s 番目に到着する列車の乗車人員、 t_{ks} は駅 k に到着する列車の前の駅からの所要時間を表す。

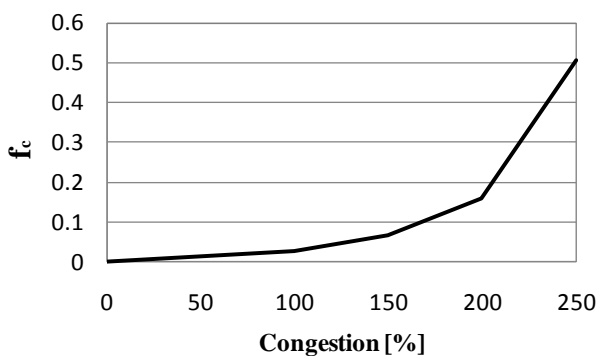


図4 混雑率と混雑損失係数の値
Fig.4 Coefficient for representing supplementary cost caused by congestion

〈4.1.3〉 その他、乗客が感じる損失

ここでは、乗換による損失、列車の待ち時間に感じる損失、駅間走行時間の延長に感じる損失を定義し、これらの損失の総計を L_3 とする。

$$L_3 = L_{3a} + L_{3b} + L_{3c} \quad (4)$$

〈4.1.3.1〉 乗換による損失

乗換による乗客の感じる負担を時間換算した損失を表す。

$$L_{3a} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} r_{ij} \quad (5)$$

ただし、 M_i は乗客 i の乗換回数、 r_{ij} は乗客 i の j 回目の乗換換算値を表す。

〈4.1.3.2〉 待ち時間に感じる損失

駅での待ち時間に感じる不快感を時間換算した損失で表す。

$$L_{3b} = w_c \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{S_i} w_{ij} \quad (6)$$

ただし、 w_c はこの損失の重み、 w_{ij} は乗客 i の駅 j での待ち時間が一定値を超える停車時間を表す。

〈4.1.3.3〉 駅間走行時間の延長に感じる損失

事故等が発生した時、駅間で長時間停車することはしばしば起こる。このとき乗客が感じる苦痛を時間換算した損失を表す。

$$L_{3c} = e_c \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^{S_k} e_{is} \quad (7)$$

ただし、 e_c は、この損失の重み、 e_{ij} は乗客 i の駅 j での駅間走行時間の延長時間を表す。

〈4.2〉 乗客の行動推定

乗客の行動推定においては、モデルに基づいて乗車する列車を決定する。この決定にはグラフ及び最短経路探索を使用する。ここでは、乗客流を表すためのグラフを構築し、現実に即した乗客行動のモデルを提案する。なお、結果については5章において示す。

〈4.2.1〉 乗客流のグラフ

各停車ノードから、図5のように、同じ列車及び乗換元から乗換先へノード間にリンクを張る。

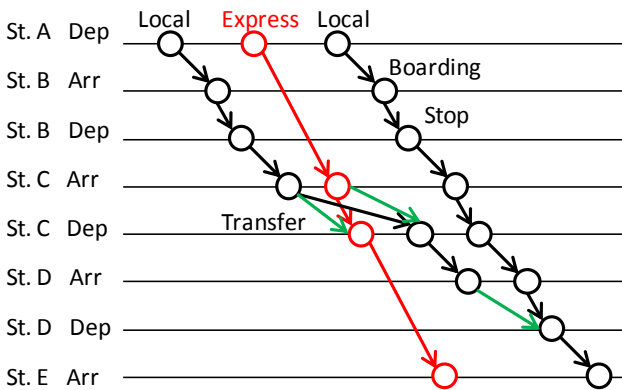


図5 乗客流のグラフ

Fig.5 An example of a graph representing passenger flow

〈4.2.2〉 乗客行動の仮定

乗客の行動を推定する為には、乗客の行動を現実に即したモデル、かつ計算時間の問題から簡易なモデルである必要がある。今回、相反するこれらの問題を考慮して、モデルを提案する。

まず、先行研究⁽⁴⁾に基づき、駅には乗客は、一様に出発駅に到着し、目的地に向かうことを仮定する。また、目的地までは、混雑を除く損失が最小となるように定める。

$$L' = L_1 + L_3 \quad (8)$$

混雑は、乗客がどの列車に乗るか検討する段階においては、確定していることではないため、乗客が行動を決定するときはその情報は使用できない。よって、混雑による損失を除くことは、合理的であると考えられる。経路探索については、ダイクストラ法を用いている。先行研究⁽⁴⁾においては、損失が最小となる経路を乗客は辿ると仮定していた。

〈4.2.3〉 乗換を回避する乗客の考慮

〈4.2.2〉において、損失が最小となる経路1つのみを仮定した。しかし、その場合、乗換を要することもありうるが、なるべく乗換をしたくないという乗客の趣向に応えることができない。先行研究⁽⁵⁾においては、MPS アルゴリズムを用いた複数経路探索が提案されたが、図6のように、各駅停車を見送って、同じ行き先の後続の各駅停車に乗る経路ができてしまう問題がある。今回、現実に即す為、図7のように、損失が最小となる経路だけでなく、乗換なしという条件のもとで損失が最小の経路2つを考えることとした。なお、図7は、最初の普通が発車した後にA駅に到着し、D駅に行きたい乗客が今回のモデルで選択しうる経路を示したものである。

ダイヤによっては、2つの経路は一致することもあるが、2つの経路があるとき乗客を適切な配分で振り分ける必要がある。その振り分けには、式9及び式10に表す非集計ロジットモデルを用いる。

$$P_A = \frac{e^{-\theta L'_A}}{e^{-\theta L'_A} + e^{-\theta L'_B}} P \quad (9)$$

$$P_B = \frac{e^{-\theta L'_B}}{e^{-\theta L'_A} + e^{-\theta L'_B}} P = P - P_A \quad (10)$$

ただし、 P はある出発駅からある到着駅までの利用しようとしている人数、 P_A は1つ目の経路に振り分ける人数、 P_B は2つ目の経路に振り分ける人数、 θ はロジットモデルの定数、 L'_A と L'_B はそれぞれの損失とする。

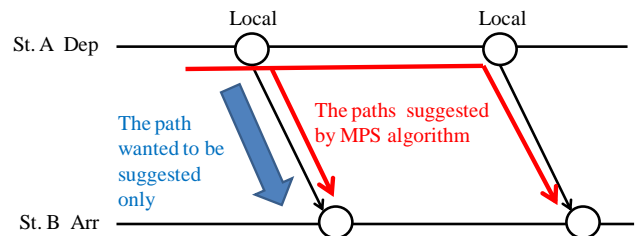


図6 MPS アルゴリズムでの問題

Fig.6 Problem of MPS algorithm

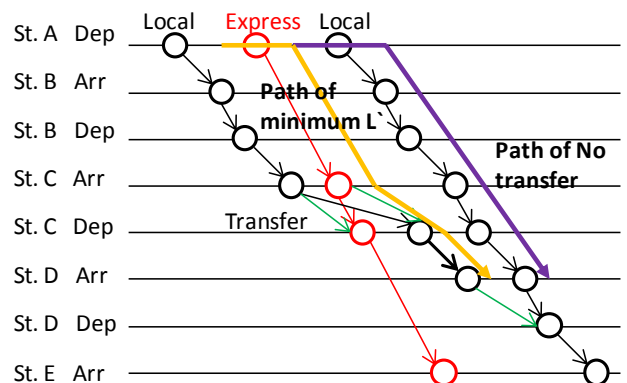


図7 仮定した2つの経路

Fig.7 Two assumed paths

5. 乗客流解析の結果

(5.1) 乗客流解析の結果

今回、図3に点線で示した計画ダイヤにおいて、(1)ダイクストラ法による最小損失経路探索のみのものと、(2)乗換なし経路探索のみ(3)今回の提案手法の3つの手法で評価値を比較する。図8において結果を示す。なお、結果は、1サイクル(15分)分である。また、図9には、F駅からG駅の列車種別毎の乗車人員割合を示す。ただしLocal α は全線通し運行、Local β は図3において中の方F駅から下の方のN駅までの区間運行である。

なお、今回、文献(6)を参考に待ち時間不効用 $w_c 1.6$ 倍、乗換不効用 5 秒とした。また、ロジットモデルの定数 $1/300 [1/s]$ という条件で行った。

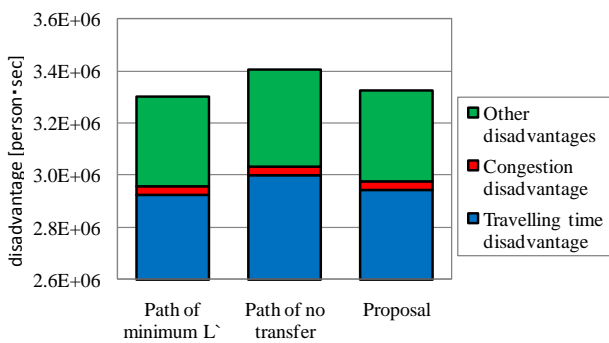


図8 各モデルによる評価値の違い

Fig.8. Comparison of passenger's disadvantage

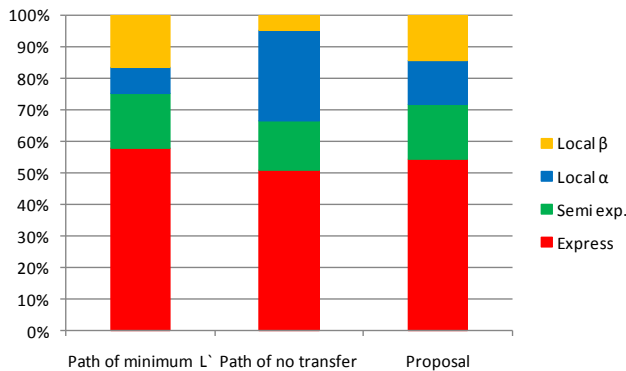


図9 乗車人員の割合

Fig.9 Proportion of train passengers

今回の結果は、所要時間による損失と駅での待ち時間による損失が主なその他の損失においては、最短損失経路探索が小さく、乗換なし経路探索は大きくなった。これは、乗換なし経路においては、駅で待つ時間が長い傾向にあるためと考えられる。

提案手法は、最小損失経路と乗換なし経路、どちらに偏ることなく、2つの乗車趣向を適切に分離し評価できていることが確認できた。また、その差はわずかとはいえ混雑損失が最も小さかった。これについて考察する。{4.1.2}の

図4及び式3から、混雑率が列車間の差が小さいほど、混雑損失は小さくなる。図9を見ると、Local α と Local β の乗車人員の割合が、最小損失経路探索では Local β に、乗換なし経路探索では Local α に集中しているが、提案モデルでは2つのLocalはほぼ一緒の乗車人員である。よって、1つの乗客趣向の仮定では利用される列車が偏って計算されざるをえなく、混雑損失が高い結果になった。それに対して、複数の乗客趣向を考慮することで利用される列車偏りが解消されたことで混雑損失が小さくなったと考えられる。

(5.2) 乗客流解析の計算時間

乗客流解析は、運転整理案が生成されるたびに行われるため、その計算時間はシステム全体の計算時間に大きく影響を与える。よって、<4.4.2>で提案した手法が著しく計算時間がかかるものであるか確認する必要がある。先行研究(6)ではMPSアルゴリズムによるk個の経路を探索することが提案されている。この時の計算時間の結果と図10で比較する。計算規模が異なるため単純な比較はできないが、MPSアルゴリズムで2つの経路を探索する計算時間と、今回提案した手法での計算時間は同じ傾向であり、提案手法が理不尽なほど計算に時間がかかるものではなく、適切な時間で計算できていることを示している。

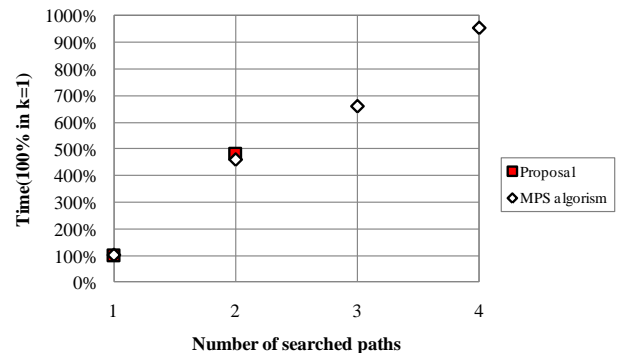


図10 計算時間の比較

Fig.10 Comparison of calculation time

6. まとめ及び今後の課題

上下両方向を考慮した複々線区間における運転整理システムの運行シミュレーションと乗客流解析の部分のアルゴリズムを示した。乗客流については、最小損失経路だけではなく、乗換を好まず乗換なし経路を辿る乗客も考慮することで、より現実的と思われる手法を提案し、結果を示した。

今後、このシステムで運転整理を行うためには、先行研究(7)より、事故発生前後の因果律を考慮した乗客流解析に改良する必要があることが分かっている。よって、この点の改善に取り組むとともに、時隔調整、抑止、順序変更、着発線変更、運転線路変更、運休といった運転整理をシミュレーションできるよう取り組む。

文 献

- (1) Nagasaki Yusaku, Eguchi Makoto and Koseki Takafumi : "Automatic Generation and Evaluation of Urban Railway Rescheduling Plan", *Proc. of Int. Symp. on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems STECH '03* (2003 年)
- (2) 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, (1986 年)
- (3) 国土交通省 : 「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2005」(2005 年)
- (4) Hara, K., Kumazawa, K. and Koseki, T.: "Efficient Algorithm for Evaluating and Optimizing Train Reschedules by Taking Advantage of Flexibility of Quadruple Track", *The Third International Conference on Railway Traction Systems (RTS2007)*, pp.91-97 (2007).
- (5) Shunichi Tanaka, Kazumasa Kumazawa and Takafumi Koseki : "PASSENGER FLOW ANALYSIS FOR TRAIN RESCHEDULING AND ITS EVALUTION", *International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems. STECH'09*, (2009 年)
- (6) 家田仁、赤松隆、高木淳、島中秀人 : 「利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価」, 土木計画学研究・論文集 No.6, pp.177-184, (1988 年)
- (7) 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」, 平成 19 年電気学会全国大会, pp.137-138, (2007 年)