

相互乗り入れ路線内の遅延損失最小化に向けた 折り返し運転開始の決定法

Deciding when to cut off the direct operation for the Minimization of Delay Loss
within Mutual Direct Operation Section

竹木 祥太*¹ 荒井 幸代*¹
Shota Takeki Sachiyo Arai

*¹千葉大学大学院融合理工学府 地球環境科学専攻 都市環境システムコース
Department of Urban Environment Systems, Division of Earth and Environmental Sciences,
Graduate School of Science and Engineering, Chiba University

The paper proposed how to estimate delay loss by cutting off the direct operation for the minimization of delay loss within mutual direct operation section. Recently, due to the spread of mutual direct operation, delay propagation becomes serious problem. Railway company does the cutting off operation against the problem. The cutting off operation generates delay loss of “railway company by transfer of railway passenger” and “railway passenger by an increase in trip time of railway passenger”, so the timing of cutting off is important, but experiential now. On the other hand, we can obtain data of “OD distribution” and “congestion rate of each train”. In this paper, first, with multi-agent simulation, we quantify delay loss of railway passenger and railway company. Next, by clustering, we extract patterns of these data in terms of delay loss. The proposed model will can estimate delay loss, if these data are obtained.

1. はじめに

相互乗り入れ運転の普及により、利用客の負担が小さくなるが、輸送トラブル 1 件あたりの平均影響列車本数は、普及以前から約 3 倍に増加している [宮崎 14]。図 1 に示すように、ある場所での遅延は相互乗り入れ路線を介して次々と他路線に伝搬する。文献 [国土交通省 05] によれば、遅延の約 4 割が相互乗り入れ路線内の遅延伝搬の影響であるといわれ、列車の遅延伝搬は相互乗り入れ運転の利便性に対する副作用といえる。

列車の遅延伝搬を抑制するための鉄道会社の施策として折り返し運転がある。折り返し運転をすれば、遅延は他路線に伝搬しないが、乗り入れ路線の利用客への負担増加、さらには鉄道会社は「振替輸送費による遅延損失」を被ると考えられる。一方、折り返し運転をしなければ、遅延は次々と他路線に伝搬し、遅延発生路線の利用客と他路線の利用客ともに「移動時間増加による遅延損失」を被ると考えられる。したがって、折り返し運転を開始するときは「鉄道会社と利用客双方の遅延損失」を考慮する必要があると考えられるが、現在、その決定は経験的に行われている。

一方で、輸送管理技術の進歩により駅の自動改札のデータを利用した利用客の OD 分布や、車両の台車空気バネのたわみによる乗車率の測定値を利用した列車の混雑率データが取得できる [辺田 09]。

そこで本研究では、「利用客の OD 分布」と「列車の混雑率」と「輸送トラブルの継続時間」の情報を用いて、折り返し運転の効果に対する定量的な評価を行い、遅延損失最小化に向けた折り返し運転開始の決定法を提案する。具体的には、はじめに、(OD 分布, 混雑率, 輸送トラブルの継続時間) ごとに、折り返し運転を開始した場合の「移動時間増加による利用客の遅延損失」と「振替輸送による鉄道会社の損失」をマルチエージェントシミュレーションにより評価する。次に、得られた、遅延による損失時間や損失金額と (OD 分布, 混雑率, 輸送トラブ

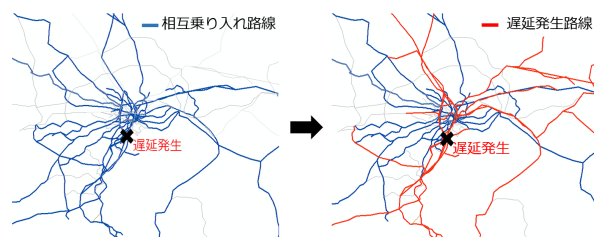


図 1: 相互乗り入れ路線を介した列車遅延伝搬の様子

ルの継続時間) の関係を分類する。これにより (OD 分布, 混雑率, 輸送トラブルの継続時間) がわかれば、「折り返し運転をしたときの遅延損失」の規模が予測できる。

2. 相互乗り入れ路線と利用客モデル

2.1 路線モデル

対象とする相互乗り入れ路線モデルの環境を $(\mathcal{R}, \mathcal{S})$ と定義する。 $\mathcal{R}$ は路線の集合, $\mathcal{S}$ は駅の集合であり, $\mathcal{R} = \{r_h | 1 \leq h \leq w, h \in \mathbb{Z}\}$, $\mathcal{S} = \{s_i | 1 \leq i \leq u, i \in \mathbb{Z}\}$ とする。また $\mathcal{S}$ の要素には各路線の接続駅 $s_b (\in \mathcal{S})$ とする。図 2 の例では $w = 2$, $u = 5$, $b = 3$ である。

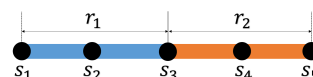


図 2: 相互乗り入れ路線モデルの例

2.2 列車モデル

本研究の列車モデルを記述する。列車の集合を $\mathcal{J} = \{j | 1 \leq j \leq m, j \in \mathbb{Z}\}$ とし、列車 j の前方列車を $j+1$, 後方列車を $j-1$, 列車 j の位置を l^j , 速度を v^j とする。図 3 に列車の運

連絡先: 竹木祥太, 千葉大学大学院融合理工学府地球環境科学専攻 都市環境システムコース, 千葉市稲毛区弥生町 1-33, 043-290-3316

転モデルを示す。列車の運転モデルは大きく 4 つのルールに分かれている。

(1) 列車は前方列車との距離に応じて、通常走行、徐行運転、一時停止をする。列車が自由に走行できる列車間距離の最小値を d_{free} 、列車が安全に走行できる列車間距離の最小値を d_{safe} とする。

(2) 列車が駅に到着すると、駅で待っている利用客は乗車し、その駅が目的地の利用客は降車する。停車時間は乗降人数によって変化し、駅で停車している時間を t_{stop} 、利用客の乗降が完了するまでの停車時間を t_{fin} とし、文献 [渡辺 00] に従って決定する。そして利用客の乗降が完了し、後方の列車の運行状況を確認してから発車する。

(3) 輸送トラブルが発生すると、全列車が一斉に運転を見合わせる。輸送トラブルが発生した路線を $r_a (a \in \mathbb{Z})$ 、輸送トラブルの時間を t_{delay} とする。また、列車の輸送トラブル継続時間の度合いを $f(t_{\text{delay}})$ として $\{1, 2, 3\}$ で表現し、大きい値から順に「大・中・小規模の遅延」と定義し [竹生 10]、これを「列車の状態」とする。

(4) 折り返し運転をすることによって、 r_a とそれ以外に路線を分割する。折り返し運転開始の際に r_a にいた列車は、輸送トラブルが終了した後で r_a だけを走行し、 r_a 以外にいた列車は、折り返し運転開始と同時に r_a 以外を走行する。折り返し運転開始時刻を t_{return} とする。

前方列車との距離に対する列車の速度のルール

1. **if** $|l^{j+1} - l^j| \geq d_{\text{free}}$ **then** $v^j = \text{通常}$
2. **elseif** $|l^{j+1} - l^j| < d_{\text{safe}}$ **then** $v^j = \text{停止}$
3. **else** $v^j = \text{徐行}$

各駅での発車のルール

4. **if** $l^j = s_i$ **then** 駅に停車, $t_{\text{stop}} \leftarrow t_{\text{stop}} + 1$

5. **if** $|l^j - l^{j-1}| \leq d_{\text{free}}$ **and** $t_{\text{stop}} \geq t_{\text{fin}}$ **then** 発車

輸送トラブル発生時のルール

6. **if** $r_a = \text{輸送トラブル発生}$
7. **while** $t = \text{運転見合わせ中}$
8. **for** $j = 1$ **to** m **do** $v^j = \text{停止}$
9. **if** $t \geq t_{\text{return}}$ **then** 折り返し運転開始
10. **if** $l^j = r_a$ **and** $t \neq \text{運転見合わせ中}$
11. **then** r_a のみを走行
12. **elseif** $l^j \neq r_a$ **then** r_a 以外を走行

図 3: 列車の運転モデル

2.3 利用客モデル

本研究の利用客モデルを記述する。利用客の集合を $\mathcal{P} = \{p_{xy}^k | 1 \leq k \leq n, k \in \mathbb{Z}, x, y \in R\}$ とし、利用客の出発駅がある路線を x 、目的地がある路線を y とする。加えて $x = y$ の利用客は単一の路線しか使わないため「単一路線利用客」とし、 $x \neq y$ の利用客は接続駅を越えて移動するため「乗り入れ路線利用客」とする。そして、(OD 分布, 混雑率) の度合いを $g(p_{xy}^k)$ として $\{1, 2, 3\}$ で表現し、これを「利用客の状態」とする。

図 4 に利用客の移動モデルを示す。利用客は列車が到着するまで駅に滞留し、到着したら乗車する。そして折り返し運転が開始すると、列車は接続駅で折り返すため、乗り入れ路線利用客は接続駅で降車する。

表 1 に利用客の迂回選択ルールを示す。利用客は列車を待つことのできる許容時間を持ち、許容時間を超えると迂回を選択する。迂回割合は、ある待ち時間に対して、その待ち時間が許容時間である利用客の割合を示している。利用客 k の許容時間を t_{allow}^k とする。加えて迂回を選択したかを $N_{\text{change}}^k \in \{0, 1\}$ で表す。利用客は目的地に着くと移動を終了する。加えて利用客 k の移動時間を t_{trip}^k 、待ち時間を t_{wait}^k とする。

利用客の乗降ルール

1. $j \leftarrow \text{乗るべき列車}$
2. **if** $l^j = \text{現在地}$ **then** 乗車
3. **else** $t_{\text{wait}}^k \leftarrow t_{\text{wait}}^k + 1$ (駅に滞留中)

折り返し時の乗降ルール

4. **if** $t \geq t_{\text{return}}$ **then** 折り返し運転開始
5. **if** $p_{xy}^k = \text{乗り入れ路線利用客}$ **and** $l^j = \text{接続駅}$
6. **then** 降車, 1 へ戻る

利用客の迂回選択ルール

7. **if** $t_{\text{wait}}^k \geq t_{\text{allow}}^k$ **then** $N_{\text{change}}^k = 1$, 迂回を選択
8. **else** $N_{\text{change}}^k = 0$, 待ちを選択

利用客の終了条件ルール

9. **if** 現在地 = 目的地
10. **end**
11. **else** $t_{\text{trip}}^k \leftarrow t_{\text{trip}}^k + 1$ (移動中), 4 へ戻る

図 4: 利用客の行動モデル

表 1: 待ち時間に対する利用客の迂回選択ルール [武藤 08]

待ち時間 (分)	5	10	20	30	45	60	90
迂回割合 (%)	7.2	10.0	15.7	31.4	5.7	21.4	8.6

3. 提案法

3.1 遅延損失の定量化

2 章のモデルにマルチエージェントシミュレーションを用いて、「列車と利用客の状態」ごとに「折り返し運転をしたときの遅延損失」を定量化する。「列車と利用客の状態」とは、「列車の状態」と「利用客の状態」から構成され、 $\{f(t_{\text{delay}}), g(p_{xy}) | x, y \in R\}$ で記述する。利用客の遅延損失は「利用客の移動時間増加」、鉄道会社の遅延損失は「利用客の迂回による振替輸送費」とする。

具体的な遅延損失の定量化について、式 (1) に利用客一人が単位遅延時間当たりに被る損失額 Q_P を示す。加えて式 (2) に鉄道会社が利用客一人に単位遅延時間当たりに払う損失額 Q_R を示す。式 (1) の Q_{loss} は利用客の一分当たりの社会的損失額、式 (2) の Q_{change}^k は利用客 k の振替損失額、式 (1), (2) の n は利用客の総数とする。

$$Q_P = \frac{Q_{\text{loss}}}{n \cdot t_{\text{delay}}} \sum_{k=1}^n t_{\text{gap}}^k \quad (1)$$

$$Q_R = \frac{1}{n \cdot t_{\text{delay}}} \sum_{k=1}^n N_{\text{change}}^k Q_{\text{change}}^k \quad (2)$$

3.2 パターン抽出

マルチエージェントシミュレーションによって得られた、列車と利用客の状態ごとの遅延損失量をクラスタリングして、各クラスタのパターンを帰納的に抽出する。クラスタリングによって、遅延損失に関して列車と利用客の状態の関係を分類することができると考えられる。加えてこの関係は一般化されているため他の路線へ適用することができると考えられる。

具体的には、クラスタリングの手法は k-means 法を用いる。k-means 法は計算時間が短いのが特徴である。そして初期状態に結果が大きく影響する性質を持つため、初期状態をランダムに変更してエントロピーが最小な結果を採用する。

4. 実験

図 2 を本実験の対象モデルとする。利用客は $\lambda = 4$ のポアソン分布に従い各駅から一様に発生し、目的駅も一様に指向する [鈴木 12]。全列車に利用客が乗車した状態で、 r_1 において輸送トラブル $t_{\text{delay}} = 10, 30, 50$ が発生する。加えて終了条件は、列車遅延が収束したときに発生した利用客が移動を終える 140 分とする。

式 (1),(2) の変数設定について、 Q_{loss} は文献 [仮屋崎 16] に従い 25 円、 Q_{change}^k は、単一路線利用客を 320 円、乗り入れ路線利用客を 700 円とする。

「列車と利用客の状態」の評価について、利用客の状態 $g(p_{xy}^k)$ の評価法は、首都圏の鉄道の平均混雑率と走行列車本数をもとに決定し [国土交通省 14]、混雑率が、180% 以上のときは $g(p_{xy}^k) = 3$ 、150% 以上 180% 以下のときは $g(p_{xy}^k) = 2$ 、150% 以下のときは $g(p_{xy}^k) = 1$ として、加えて $g(p_{\text{all}}) = g(p_{11}) + g(p_{12}) + g(p_{21}) + g(p_{22})$ とする。列車の状態 $f(t_{\text{delay}})$ の評価法は、輸送トラブル継続時間が、40 分以上のときは 3、20 分以上 40 分未満のときは 2、20 分未満のときは 1 とする。

パターン抽出のフェーズでは、マルチエージェントシミュレーションによって得られた、列車と利用客の状態ごとの遅延損失量を、k-means 法によってクラスタリングを行い、列車と利用客の状態と遅延損失の規模の関係を考察する。

4.1 鉄道会社の遅延損失

鉄道会社の遅延損失は、利用客の迂回による振替輸送費である。実験では、折り返し運転をしたときの「鉄道会社の遅延損失額」の大きさをもとに、列車と利用客の状態を 3 個のクラスタに分けた。鉄道会社の遅延損失が小さいクラスタから順に $\{C_1, C_2, C_3\}$ と表記する。実験の結果、4 つのパターンが抽出できた。

(1) 「 $f(t_{\text{delay}}) = 3 \Rightarrow C_1$ 」であった。 r_1 で発生した大規模の遅延は、折り返し運転をしなければ、 r_2 でも大規模の遅延となり、 p_{22} は待ち時間増加により迂回を選択する。そこで折り返し運転によって、遅延発生路線と分離して遅延の伝搬を防ぎ、 p_{22} の迂回者数を抑制できると考えられる。大規模の遅延では、 r_1 の利用客の迂回選択は不可避であるため、 p_{22} の迂回選択を防ぐことが、鉄道会社の遅延損失を小さくすると考えられる。そのため大規模の遅延では、利用客の状態によらず、折り返し運転によって、鉄道会社の遅延損失の規模が小さくなると考えられる。

(2) 「 $f(t_{\text{delay}}) = 1 \Rightarrow C_3$ 」であった。小規模の遅延では、遅延は r_2 まで伝搬せず、 p_{22} は迂回を選択しないため、乗り入れ路線利用客の迂回選択を抑制することが、鉄道会社の遅延損失を小さくすると考えられる。しかし乗り入れ路線利用客は、折り返し運転のもとでは s_3 で一度降車するため、待ち時間増加により迂回を選択すると考えられる。そのため小規模の遅延

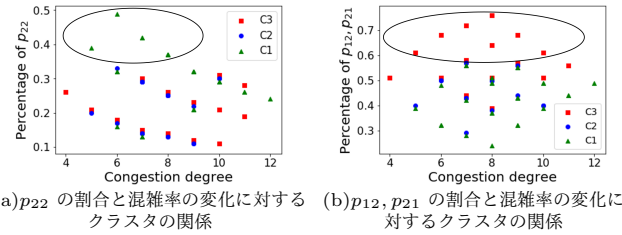


図 5: 中規模の遅延における「利用客の状態」と「鉄道会社の遅延損失の規模」の関係

では、利用客の状態によらず、折り返し運転によって、鉄道会社の遅延損失の規模が大きくなると考えられる。

(1),(2) より、 $f(t_{\text{delay}}) = 3, 1$ のときは、遅延損失の規模は「利用客の状態」に依存しなかったが、 $f(t_{\text{delay}}) = 2$ のときは、「利用客の状態」に依存した。図 5 に中規模の遅延における、利用客の状態とクラスタの関係を示す。縦軸について、(a) は全利用客に対する p_{22} の割合で、(b) は全利用客に対する p_{12}, p_{21} の割合であり、横軸は両者ともに列車の混雑率の度合いである。

(3) 図 5(a) より、「 $f(t_{\text{delay}}) = 2 \wedge \frac{g(p_{22})}{g(p_{\text{all}})} \geq 0.35 \Rightarrow C_1$ 」であった。中規模の遅延では、利用客間で遅延損失に関してトレードオフが発生する。加えて折り返し運転によって、 p_{22} の迂回選択は抑制できると考えられる。そのため中規模の遅延で、遅延が発生していない路線で移動が完結する利用客が多いと、折り返し運転は鉄道会社の遅延損失の規模を小さくすると考えられる。

(4) 図 5(b) より、「 $f(t_{\text{delay}}) = 2 \wedge \frac{g(p_{12})+g(p_{21})}{g(p_{\text{all}})} \geq 0.6 \Rightarrow C_3$ 」であった。折り返し運転によって、乗り入れ路線利用客は待ち時間増加により迂回を選択すると考えられる。そこで中規模の遅延で、乗り入れ路線利用客が多いと、折り返し運転は鉄道会社の遅延損失の規模を大きくすると考えられる。

4.2 利用客の遅延損失

利用客の遅延損失は、移動時間が通常よりも増加することによる社会的費用である。実験では、折り返し運転を行ったときの「利用客の遅延損失額」の大きさをもとに、列車と利用客の状態を 3 個のクラスタに分けた。利用客の遅延損失が小さいクラスタから順に、 $\{C_4, C_5, C_6\}$ と表記する。実験の結果、4 つのパターンが抽出できた。

(1) 「 $f(t_{\text{delay}}) = 3 \Rightarrow C_4$ 」であった。大規模の遅延では、 r_1 の利用客の移動時間増加は不可避であるため、 p_{22} の移動時間増加を抑制することが、利用客の遅延損失を小さくすると考えられる。そのため大規模な遅延では、利用客の状態によらず、折り返し運転によって、利用客の遅延損失の規模を小さくすると考えられる。

(2) 「 $f(t_{\text{delay}}) = 1 \Rightarrow C_6$ 」であった。小規模の遅延では、 p_{22} の移動時間は増加しないため、乗り入れ路線利用客の移動時間増加を抑制することが、利用客の遅延損失を小さくすると考えられる。しかし乗り入れ路線利用客は、折り返し運転のもとでは移動時間が増加する。そのため小規模の遅延では、利用客の状態によらず、折り返し運転によって、利用客の遅延損失の規模を大きくすると考えられる。

(1),(2) より、 $f(t_{\text{delay}}) = 3, 1$ のときは、遅延損失の規模は「利用客の状態」に依存しなかったが、 $f(t_{\text{delay}}) = 2$ のときは、「利用客の状態」に依存した。図 6 に中規模の遅延における、利用客の状態とクラスタの関係を示す。縦軸と横軸は、(a) は図 5(a) と、(b) は図 5(b) と同じである。

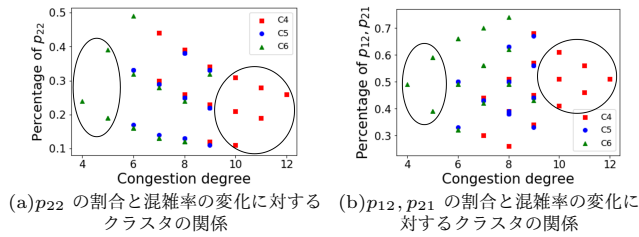


図 6: 中規模の遅延における「利用客の状態」と「利用客の遅延損失の規模」の関係

(3) 図 6(a),(b) より, 「 $f(t_{\text{delay}}) = 2 \wedge g(p_{\text{all}}) \geq 10 \Rightarrow C_4$ 」であった。列車の混雑率が高いと、駅での乗降時間は通常よりも長くなる [渡辺 00]。また折り返し運転をしないと、中規模の遅延は r_1 だけでなく r_2 でも大規模の遅延になり、全利用客の移動時間が増加する。そこで折り返し運転によって、 r_2 を利用する客の移動時間増加は抑制できると考えられる。そのため中規模の遅延で、列車の混雑率が高いと、折り返し運転は利用客の遅延損失の規模を小さくすると考えられる。

(4) 図 6(a),(b) より, 「 $f(t_{\text{delay}}) = 2 \wedge g(p_{\text{all}}) \leq 5 \Rightarrow C_6$ 」であった。列車の混雑率が低いと、駅での乗降時間は変わらないため [渡辺 00]、折り返し運転をしなくても中規模の遅延は次第に収束すると考えられる。しかし折り返し運転によって、乗り入れ路線利用客は接続駅で降車する必要があるため、移動時間は増加する。そのため中規模の遅延で、列車の混雑率が低いと、折り返し運転は利用客の遅延損失の規模を大きくすると考えられる。

4.3 鉄道会社と利用客双方の遅延損失

折り返し運転によって、鉄道会社と利用客双方の遅延損失は、大規模の遅延では小さくなり、小規模の遅延では大きくなった。またこの結果は、利用客の状態によらず自明であった。しかし中規模の遅延では、利用客の状態によって、鉄道会社と利用客双方の遅延損失が異なった。そして中規模の遅延に関して、4.1 節から、鉄道会社の遅延損失の規模は、利用客の OD 分布と関係があると考えられる。加えて、4.2 節から、利用客の遅延損失の規模は、利用客の混雑率と関係があると考えられる。以下に 3 つの考察を挙げる。

(1) p_{22} の割合が高く、列車の混雑率が高いときは、折り返し運転によって、鉄道会社と利用客双方の遅延損失は小さくなった。東武伊勢崎線と東京メトロ半蔵門線は相互乗り入れ運転を行っていて、東武伊勢崎線で遅延が発生したとき、鉄道会社はすぐに折り返し運転をしている [国土交通省 16]。両線は列車の混雑率が高く、加えて OD 分布は半蔵門線だけで移動が完結する利用客が多いため「列車の混雑率が高く、遅延が発生していない路線で移動が完結する利用客が多い $\Rightarrow$ 鉄道会社と利用客双方の遅延損失の規模が小さい」の関係のもとで折り返し運転をしていると考えられる。

(2) 「 $g(p_{11}) = g(p_{12}) = g(p_{21}) = g(p_{22})$ 」のときは、遅延損失の規模に大小関係がなかった。これは利用客の OD 分布が均一のときは、遅延の損失に対して利用客間でトレードオフが発生するためであると考えられる。東京メトロ半蔵門線と東急田園都市線は相互乗り入れ運転を行っていて、どちらかで遅延が発生すると、遅延は他方まで伝搬する [国土交通省 16]。これは両路線での利用客の OD 分布が均一であるため、遅延損失を小さくする折り返し運転開始の決定ができないと考えられる。

(3) p_{11} の人数と遅延損失の規模に大小関係がなかった。 r_1 の遅延規模は折り返し運転の開始によらないため、「遅延が発生する路線で移動が完結する利用客」の割合と無関係であると考えられる。

5. まとめと課題

本研究では、相互乗り入れ運転普及による列車の遅延拡大に対して、(利用客の OD 分布, 列車の混雑率, 列車の輸送トラブル継続時間) を考慮した折り返し運転の導入に着目した。

はじめに、マルチエージェントシミュレーションにより、(OD 分布, 混雑率, 輸送トラブルの継続時間) ごとに「折り返し運転をしたときの遅延損失」を定量化した。次に、その遅延損失額をクラスター分析することによって、条件部が (OD 分布, 混雑率, 輸送トラブル継続時間)、行動部が「折り返し運転をしたときの遅延損失」からなるルール群を事例として抽出した。これにより折り返し運転開始の決定法を提案した。

実験では、折り返し運転をすることによって生じる遅延損失に関して、(OD 分布, 混雑率, 輸送トラブル継続時間) のパターンを抽出したが、得られたルール群の有効性を評価するために、異なる環境でシミュレーションをする必要がある。これらのシミュレーション結果に基づいたパターン分類によって (OD 分布, 混雑率, 輸送トラブル継続時間) に対して、折り返し運転を決定するシステムが構築できる。

参考文献

- [宮崎 14] 宮崎一浩, 日比野直彦, 森地茂: “路線の特性に着目した都市鉄道における列車遅延分析”, Vol.70, No.5, 土木計画学研究, 論文集第 31 巻
- [国土交通省 05] 国土交通省: “サービスの高度化に伴い発生する遅延などに対応した定時運行の確保方策に関する調査”
- [辺田 09] 辺田文彦: JR 東日本研究開発センター, 先端鉄道システム開発センター, “輸送管理システムの開発概要”, *JREast Technical Review*, No.28
- [渡辺 00] 渡辺将一郎, 岩倉成志: “都市鉄道の時刻別需要予測のためのリンクパフォーマンス関数に関する研究”, 土木学会第 55 回年次学術講演会, 2000.9
- [武藤 08] 武藤雅威, 輸送情報技術研究部, 交通計画: “運転再開時の旅客予測手法の開発”, Vol.22, No.6, Jun.2008, 鉄道総研報告
- [鈴木 12] 鈴木章悦, 日比野直彦, 森地茂: “都市開発による鉄道駅の混雑と施設容量に関する研究”, 運輸政策研究, 政策研究論文, Vol.15, No.3, 2012
- [仮屋崎 16] 仮屋崎圭司: “都市鉄道における列車遅延の回復メカニズムの解明と列車遅延防止対応策”, 2016.3
- [国土交通省 14] 国土交通省: “東京圏における都市鉄道の現状と課題について” (補足資料), 2014
- [竹生 10] 竹生修己: “鉄道ダイヤ回復の秘密”, 電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会, 2010
- [国土交通省 16] 国土交通省: “東京圏における主要区間の混雑率”, 2016