

# 高頻度運行都市鉄道システムにおける 列車－乗客の流率密度関係の検証

今岡 将大<sup>1</sup>・瀬尾 亨<sup>2</sup>・福田 大輔<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 グローバルカンパニー 鉄道部 (〒 101-8462 千代田区神田錦町 3-22)  
E-mail: masahiro.imaoka@tk.pacific.co.jp

<sup>2</sup>正会員 東京大学助教 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒 113-8656 文京区本郷 7-3-1)  
E-mail: seo@civil.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)  
E-mail: fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

首都圏の都市鉄道では、多くの路線で高頻度運行を行い高需要にできる限り対応している反面、一度遅延が発生すると様々な混雑により慢性的に続いてしまう傾向が見られる。この問題の解決には、列車－乗客間の関係性を考慮した列車遅延現象の適切な把握と各遅延対策の評価を可能とするための定量的分析手法の構築が必要である。本研究では、①列車流率、②列車密度、③乗客需要の3つの交通状態量を変数とした流率密度関係(Fundamental Diagram)に関する理論モデル(鉄道FD)の現実妥当性について、実際の列車運行実績記録を用いて検証した。検証は、鉄道FD式で用いられるパラメータの設定手法を2通り試行することにより行ったが、いずれの手法においても、各駅間で区切り検証を行った場合よりも対象区間全域で検証を行った方が現況再現性が高くなることが確認された。

**Key Words:** train delay, fundamental diagram, validation, passenger-flow, train-congestion

## 1. はじめに

### (1) 背景

首都圏における都市鉄道では、1956年(昭和31年)に発行された都市交通審議会(現:交通政策審議会)答申第1号を皮切りとする全9回に及ぶ答申に基づき、新線の建設並びに複々線化・地下化工事等により路線網の拡充が行われ、利便性の向上や通勤ラッシュ時における混雑の緩和が実現されてきた。

そのような設備面の改良だけでなく、今日においては、既存の線路容量を最大限活用することで、最短2～3分間隔の高頻度運行を行うという運用面での改良により、各鉄道路線は通勤ラッシュ時の高需要に対し最大限の対応を行なっている。しかしながら、このような列車が密に運行されているような状態では、一度遅延が発生すると、それが小規模なものであったとしても、局所的に列車運行間隔が通常より長くなり、駅のホームや車内での混雑が激化してしまうということが少なからず発生する。これにより、乗降時間の増加、ひいては列車同士の局所的な渋滞(団子運転)といったものが生じ、遅延が更に悪化し、時空間的に波及してしまう。これはつまり、高頻度運行下では、小さな遅延が乗客の混雑や線路上の列車群の混雑(渋滞)を介すことで、更に大きな遅延を招くという負の連鎖が生じてしまうということである。このような理由から、

高頻度運行を行うような路線では、遅延が頻繁に発生しやすい傾向にあると考えられ、解決が急がれる喫緊の課題の一つとすることができる。特に、遅延時間が30分以下(かつ3分以上)に収まるような短時間の遅延(以降、小規模遅延と呼ぶ)については、国土交通省<sup>1)</sup>が示しているように、その遅延時分こそ短いものの、比較的頻繁に起こるものであり、さらに、発生原因としては混雑が約半数を占めている。

一方で、各鉄道会社では様々な列車遅延対策を講じているものの、それら対策の効果を定量的に分析する定型的な手法は存在しない。しかし、その定量的分析に必要な現象把握という観点では、2.で詳述するように、遅延量の予測を試みた研究がいくつかなされている。特に、瀬尾ら<sup>2)</sup>では、自動車交通流分析で広く用いられているFundamental Diagram(FD)を用いた高頻度運行都市鉄道運行システムの表現手法を提案した。この手法では、個々の列車ではなく運行している列車を群と捉えてマクロに解析しているものの、FDという交通流理論における一般的な理論に基づいた手法であるため、モデル構築の簡易性や実用性を確保した手法と言える。しかし、当手法ではFD式の導出やそれを用いた列車運行システムの記述方法について述べてはいるものの、実運行に対する再現性については検証されていない。モデルの実用性を高めるためには、都市鉄道

におけるFD（鉄道FD）、及び、それを援用したマクロな高頻度鉄道運行モデルを、実際の列車運行実績データや旅客需要データを用いて検証し、理論モデルの妥当性を明らかにする必要がある。

## (2) 目的

本研究の目的は、既往研究で提案された鉄道FDの妥当性を実データに基づき検証することである。これにより、鉄道FDによって様々な混雑に起因する高頻度運行都市鉄道における遅延現象を適切に把握できているかどうかについて実証的に考察する。

## 2. 既往研究の整理

今回対象とする高頻度運行都市鉄道における遅延については様々な研究がなされている。特に、遅延量の予測を試みた研究としては以下のようなものが挙げられる。仮屋崎ら<sup>3)</sup>では、朝ピーク時の東急田園都市線・東京メトロ半蔵門線を対象として、現実の列車閉塞区間と同様にセルを分割した上でセルオートマトン法を用い、列車の相互作用と列車信号方式により時系列で変化する走行速度を列車ごとに決定することで、列車運行の挙動を再現するシミュレーションモデルを提案した。岩倉ら<sup>4)</sup>では、同路線を対象として、線路上での列車間の接近時の相互作用に加えて自律的な判断をする利用者の相互作用を表現するマルチエージェントシステムを用いて、列車遅延状況の推定を行うマルチエージェントモデルを考案した。一方、解析的な研究として、和田ら<sup>5)</sup>では、交通流理論を援用し、停車区間・走行区間における遅延伝播メカニズムを考慮した列車運行モデルの構築ならびに運行制御方策の導入による運行ダイヤに従う列車運行システムが安定化されることについての証明をした。

以上のように、都市鉄道における列車遅延研究は様々に行われてきた。特に、前述した仮屋崎ら<sup>3)</sup>や岩倉ら<sup>4)</sup>では既にある一定程度の再現性を得ており、特に後者においては、ホーム上の乗客混雑と線路上の列車群混雑を考慮したシミュレーションモデルを構築している。これらのモデルは、ミクロな視点で個々の列車について分析を行う手法であるため、ある特定列車のある特定駅での停車時間を増減させる等といった運転面での遅延対策を検討する際に有効な効果分析手法となり得る。

一方で、ミクロなモデルの使用にあたっては、そのキャリブレーションのため極めて詳細なデータが必要になる。この課題に対応するため、1.で述べた瀬尾ら<sup>2)</sup>は詳細なデータを必要としないマクロなモデル、すなわち鉄道FDを提案した。これは、その因果関係の明確さ、キャリブレーションの簡便さ、計算の容易さによ

り、鉄道運行に関するより戦略的な意思決定（例：平均運行間隔の設定、路線全体での駅入場規制、時間帯別料金設定）に関して知見を得るのに有効と期待される。ただし、瀬尾ら<sup>2)</sup>はあくまで鉄道FDの理論的導出とシミュレーションによる検証を行ったのみであり、実データに基づく検証はなされていない。

## 3. 鉄道FDの導出

### (1) 自動車交通流で適用されるFD

自動車交通流における一般的なFDは、交通流率 $q$ 、交通密度 $k$ 、空間平均速度 $v$ の3つの交通状態変数の関係性を記述するものである。特に $q-k$ 関係の関数形 $q=Q(k)$ のうち、典型的な形状は例えば図-1で示すようなものである。

上記に示したFDを、ある特定エリア全体の自動車交通流に応用し、巨視的な分析を行う手法として、MFD(Macroscopic Fundamental Diagram)がある。MFDは、あるエリア内の自動車交通システムの巨視的な供給能力 $(q, v)$ を、システムに対する需要・負荷 $(k)$ の関数として表現したものである。交通状態の表現が簡潔になるため、システムに関する戦略的な意思決定のために有用である。また、実データに基づく実証もなされている。このMFDを用いることで、エリア全体としての交通状態を評価することができ、さらに、エリア内の交通制御が可能となり、様々な交通政策の評価分析にも応用することができる。Geroliminis and Daganzo<sup>6)</sup>では、MFDの概念を用いた実証分析がなされた。

### (2) 本研究で用いる鉄道FD

一般的に、FDは(1)のように自動車交通流で広く用いられる分析手法である。一方で、列車遅延を分析するにあたっては、車両（列車）の運行挙動以外にも乗客流について考慮する必要がある。なぜなら、1.(1)で述べたように、乗客の流動も列車遅延を引き起こす要因の一つとなるからである。よって本研究ではその点を

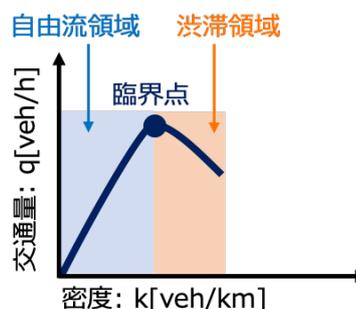


図-1 FD

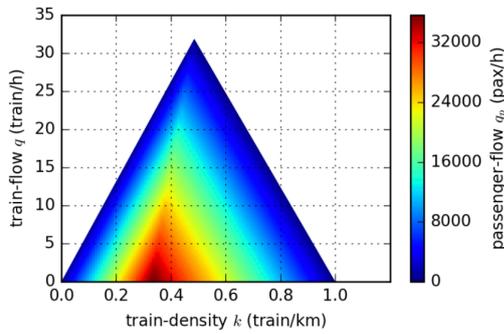


図-2 本研究で用いる鉄道FD(出典：Seo et al.<sup>7)</sup>)

勘案し、乗客流を考慮したFDを用いる。具体的には、図-2のような列車流率-列車密度-乗客流率という3つの変数の関係性を表す鉄道FD(瀬尾ら<sup>2)</sup>)を採用する。ある乗客流率 $q_p$ のときに描かれる直線を様々な $q_p$ に対し定義することで、このようなグラデーションによる図が完成される。この鉄道FDを用いることで、線路上の列車混雑とホーム上の乗客の混雑の2種類を考慮することができる。

しかし、列車遅延現象を分析する本研究において、FDを用いる際の問題点がある。それは、FDがマクロな解析手法であるという点である。つまり、FDを用いると個々の列車の遅延を把握することはできない。一方、線路上を走行する列車群を1つの集団として捉えて、渋滞(線路上の列車混雑)が生じているかを分析することは可能である。

そこで、本研究では、個々の列車の遅延がどのように発生しているかといったミクロな分析を行うのではなく、列車群の渋滞が生じているかどうかといったマクロな分析を行い、現象把握を行うものとする。

### (3) 鉄道FDの導出プロセス

本節の内容は瀬尾ら<sup>2)</sup>に基づき一部改変したものである。

#### a) 仮定

単純鉄道運行モデルを構築するにあたり、列車の駅での停車挙動と列車の駅間走行挙動について単純な仮定をおく。これらは和田ら<sup>5)</sup>で用いられている仮定と同様である。

列車の乗降時間については、Point Queueモデルによって表現されるものとする。つまり、乗客の列車に対する乗降は一定流率 $\mu_p$ でなされ、安全確認等のために一定時間 $g_b$ の余裕があると仮定する。このとき、列車の駅での停車時間 $t_b$ は

$$t_b = \frac{n_p}{\mu_p} + g_b \quad (1)$$

と記述できる。 $n_p$ は乗車待ち乗客数である。乗車待ちの乗客は、全員最初に到着した列車に乗車すると仮定している。これはつまり、列車内容量は無限大であることを意味する。

列車の駅間での走行挙動には、Newell<sup>8)</sup>の単純追従モデルを仮定する(和田ら<sup>5)</sup>と同様)。本モデルは、自動車交通流の記述によく用いられるLighthill and Whitham<sup>9)</sup>やRichards<sup>10)</sup>のLighthill - Whitham - Richards (LWR)モデルにおける特殊ケースである。本モデルでは、最小安全間隔を保ちつつできる限り速く走行すると仮定している。 $x_m(t)$ を列車 $m$ の時点 $t$ の位置とすると、

$$x_m(t) = \min\{x_m(t - \tau) + v_f \tau, x_{m-1}(t - \tau) - \delta\} \quad (2)$$

と決定される。 $m-1$ は、一つ前を走行する列車を表し、 $\tau$ は最小車頭時間(運転者の反応時間と同等)、 $v_f$ は自由流速度(すなわち、最大速度)、 $\delta$ は最小車頭距離を表す。

式(2)のうち、第1項は列車が最大速度で走行可能な自由流領域における交通状態を表し、第2項は、渋滞領域における交通状態を表す。これは、列車が一つ前の列車に追いつき、安全車頭間隔 $\tau$ と安全車頭距離 $\delta$ を同時に保つように減速を強いられている状態である。臨界領域では、列車の速度が $v_f$ であり、かつ一つ前の列車に追いついている。一般性を失わないため、自由流時の前列車との間の余裕車頭時間として $h_f(\geq 0)$ を導入する。

#### b) 定常運行時の交通状態

次に、a)に基づき、定常状態における列車運行システムを定義する。列車運行システムにおける定常状態とは、以下のすべての条件が満たされる状態を言う。

- 1) モデル変数( $\mu_p, g_b, v_f, \tau, \delta$ )が一定である
- 2) すべての隣接駅間距離 $l$ が等しい
- 3) すべての列車の運行間隔時間 $H$ が等しい
- 4) すべての列車の駅間走行速度 $v$ が等しい
- 5) すべての駅への乗客到着流率 $q_p$ が等しい
- 6) すべての列車はすべての駅に停車する

また、列車運行が適切になされるために、 $q_p < \mu_p$ と仮定する。そうでなければ、乗客の乗車が永遠に終わらないことを意味する。定常状態下では、列車の駅での停車時間を表す式(1)は、 $n_p$ が $q_p H$ と等しいため、

$$t_b = \frac{q_p H}{\mu_p} + g_b \quad (3)$$

と書き改めることができる。

先述した3つの交通状態における列車運行システムをタイムスペースダイアグラムとして描画したものが、図-3である。横軸は時間軸であり、縦軸は空間を表す。そして、直線は列車の軌跡を表す。

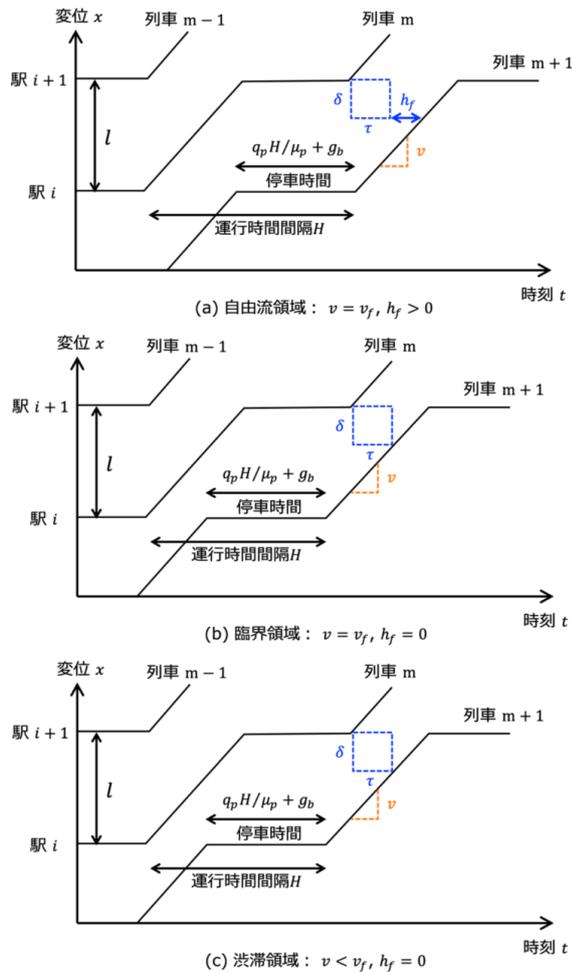


図-3 3つの交通状態における列車運行システム

それぞれの図において、列車  $m$  は駅  $i$  を出発した後、駅  $i+1$  に向けて速度  $v$  で走行する。図-3(a) は速度  $v$  が自由流速度  $v_f$  に等しく、 $h_f$  は 0 より大きい。よって、この交通状態は、自由流領域に分類される。同様に、図-3(b) では速度  $v$  が自由流速度  $v_f$  に等しいが、 $h_f$  が 0 となっている。よって、この交通状態は、臨界領域に分類される。最後に、図-3(c) では速度  $v$  は自由流速度  $v_f$  より小さくなっている。よって、この交通状態は、渋滞領域に分類される。

### c) Fundamental Diagram の立式

一般的には、列車運行システムにおいては以下のような変数が考えられる。

- 列車流率  $q$
- 列車密度  $k$
- 列車平均速度  $\bar{v}$
- 乗客流率  $q_p$
- 乗客密度  $k_p$
- 乗客平均速度  $\bar{v}_p$

以上挙げた中で、うち 3 つは独立変数となる。それは、列車流率  $q$ 、列車密度  $k$  そして乗客流率  $q_p$  である。なぜなら、 $q = k\bar{v}$ 、 $q_p = k_p\bar{v}_p$  及び  $\bar{v} = \bar{v}_p$  が成り立つから

である。

定常状態における上記 3 つの独立変数の関係式は、関数  $Q$  を用いて以下のように表現できる。

$$q = Q(k, q_p) \quad (4)$$

このとき、関数  $Q$  は、列車運行システムにおける FD と位置付けられる。列車運行が式 (1)、式 (2) に従うとき、FD 関数は以下のように導出することができる。

$$Q(k, q_p) = \begin{cases} \frac{lk - q_p/\mu_p}{g_b + l/v_f} & (k < k^*(q_p)) \\ -\frac{l\delta}{(l-\delta)g_b + \tau l}(k - k^*(q_p)) + q^*(q_p) & (k \geq k^*(q_p)) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $q^*(q_p)$  及び  $k^*(q_p)$  はある  $q_p$  のもとの臨界領域における流率、密度であり、

$$q^*(q_p) = \frac{1 - q_p/\mu_p}{g_b + \delta/v_f + \tau} \quad (6)$$

$$k^*(q_p) = -\frac{(l-\delta)/v_f - \tau}{(g_b + \delta/v_f + \tau)\mu_p l} q_p + \frac{g_b + l/v_f}{(g_b + \delta/v_f + \tau)l}$$

と表される。

### d) 議論

式 (5) は、ある列車密度  $k$  (路線内に供給される列車数) と乗客流率  $q_p$  (乗客需要) と技術的な固定パラメータ ( $\mu_p, g_b, v_f, \tau, \delta, l$ ) が設定された時の、列車流率  $q$  と平均速度  $\bar{v} = q/k$  を決める関数と捉えることができる。実際、式 (5) は一見複雑に見えるものの、単純に、ある乗客流率  $q_p$  での  $q$  と  $k$  の線形関係を表しているに過ぎない。式 (5) に表-1 で示したような実際のパラメータ値を代入し描画を行なったものが、図-2 である。

式 (5) において、 $k$  と  $k^*(q_p)$  の大小関係により場合分けされた 2 つの直線が定義されているが、これが図-2 における三角形の形状を作り出している。

前述の通り、ある  $q_p$  のもとの  $q^*(q_p)$  及び  $k^*(q_p)$  は、臨界領域における流率、密度を表している。そして、 $k < k^*(q_p)$  のとき列車は自由流領域での走行を行っており、 $k > k^*(q_p)$  のとき列車は渋滞領域での走行を行っていることを意味する。

ところで、式 (4) 及び式 (5) は Edie の定義<sup>11)</sup> を適用して導出している。したがって、この FD は交通工学に

表-1 図-2 の描画に用いたパラメータ (Seo et al.<sup>7)</sup> より)

乗客流率 $\mu_p$	36000 [pax/h]
確認時間 $g_b$	10/3600 [h]
最大速度 (自由流速度) $v_f$	70 [km/h]
最小車頭時間 $\tau$	1/70 [h]
最小車頭距離 $\delta$	1 [km]
隣接駅間距離 $l$	3 [km]

における基礎理論を十分踏襲したものとなっている。定常状態下での列車運行における各変数は、Edieの交通状態から以下のように導出できる。

$$q = \frac{1}{H} \quad (7)$$

$$k = \frac{q_p H / \mu_p + g_b + l/v}{lH} \quad (8)$$

$$\bar{v} = \frac{l}{q_p H / \mu_p + g_b + l/v} \quad (9)$$

#### (4) マクロな動的モデルへの拡張

本節の内容は瀬尾ら<sup>2)</sup>に基づき一部改変したものである。

(3)で定式化したFDを用いて、需要(乗客流率)と供給(列車流率)が動的に変化する場合の鉄道運行モデルの構築も可能となる。本モデルは、個々の列車や乗客の軌跡を考慮しないという点で、マクロなモデルと言える。

本モデルは、Merchant and Nemhauser<sup>12)</sup>及びCarey and McCartney<sup>13)</sup>のexit-flow modelに基づくものである。つまり、(3)で定式化したFDをexit-flow functionとして用いることとなる。更に言い換えれば、鉄道運行システムが図-4で示すように、input-outputシステムによって構築されるということである。この手法は、動的かつ複雑な大規模問題を解く際の計算負荷が軽減されるという利点があり、Daganzo<sup>14)</sup>では詳細なメカニズムの考慮が難しい都市交通の巨視的な近似表現であるMacroscopic Fundamental Diagram (MFD)の解析に用いられた。

定式化については以下の通りである。時刻 $t$ において、 $a(t)$ をシステムへの列車流入流率、 $a_p(t)$ をシステムへの乗客流入流率、 $d(t)$ をシステムからの列車流出流率、 $d_p(t)$ をシステムからの乗客流出流率とする。また、初期時刻を $0$  ( $t \geq 0$ )と設定する。さらに、 $A(t)$ 、 $A_p(t)$ 、 $D(t)$ 及び $D_p(t)$ を、それぞれ $a(t)$ 、 $a_p(t)$ 、 $d(t)$ 及び $d_p(t)$ の累積数とする(例えば、 $A(t) = \int_0^t a(s) ds$ )。

そして、 $T(t)$ を時刻 $t$ にシステム内に進入した列車のシステム内旅行時間とおくと、初期値 $T(0)$ は $q = a(0)$ 及び $q_p = a_p(0)$ という条件下での自由流時の旅行時間

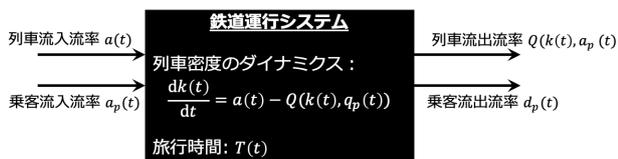


図-4 input-output システムによる鉄道運行システム

によって与えられる。定式化を簡単にするため、乗客の旅行距離は列車の旅行距離と同じと仮定する。これはつまり、 $T(\cdot)$ が列車・乗客双方の旅行時間を表現するということである。以上で列挙した関数は、以下のように定義することができる。

- $a(t)$ : 時刻  $t$  における列車のシステム内始発駅への出発流率
- $a_p(t)$ : 時刻  $t$  における乗客のシステム内始発駅への到着流率
- $d(t)$ : 時刻  $t$  における列車のシステム内終着駅への到着流率
- $d_p(t)$ : 時刻  $t$  における乗客のシステム内終着駅への到着流率
- $T(t)$ : 時刻  $t$  にシステムに進入した時の、列車・乗客のシステム内旅行時間。

このとき、システム内終着駅の到着時刻は、 $t + T(t)$ となる。

したがって、実際には、 $a(\cdot)$ 、 $a_p(\cdot)$ は列車運行計画や乗客の出発時刻選択によってそれぞれ外生的に決定され、 $d(\cdot)$ 、 $d_p(\cdot)$ や $T(\cdot)$ はモデルによって内生的に決定される変数となる。

以上の条件を踏まえ、exit-flow modelを適用させることで列車流率は以下のように導出される。まず最初に、exit flowである $d(t)$ を以下のように仮定する。

$$d(t) = Q(k(t), a_p(t)) \quad (10)$$

ここで、FD関数 $Q(\cdot)$ はexit-flow functionとして考えている。これはつまり、鉄道運行システムのダイナミクスを以下の列車交通量保存則

$$\frac{dLk(t)}{dt} = a(t) - Q(k(t), a_p(t)) \quad (11)$$

によってモデル化するということである。ここで、 $L$ は路線長に相当する。また、 $k(t)$ はシステム内の平均列車密度であり、

$$k(t) = \frac{A(t) - D(t)}{L} \quad (12)$$

と定義することができる。上述した関数や関係式( $T(0)$ 、 $a(t)$ 、 $a_p(t)$ や式(10)、式(12))によって、 $d(t)$ 及び $D(t)$ が逐次的に算出される。すなわち、列車流率は、初期条件と境界条件及びFDに基づいたexit-flow modelによって導出される。

一方、乗客流率は以下のように導出される。まず最初に、システム内旅行時間の定義式を利用して

$$A(t) = D(t + T(t)) \quad (13)$$

と定式化される。 $A(t)$ 、 $D(t)$ はそれぞれ既知なので、システム内時間 $T(t)$ は式(13)より導出される。そして、

$d_p(t)$ ,  $D_p(t)$  は乗客のシステム内旅行時間  $T(t)$  の定義から導出される。

$$A_p(t) = D_p(t + T(t)) \quad (14)$$

### (5) モデルの再現性について

以上 (3), (4) で紹介したことが, Seo et al.<sup>7)</sup> で提案された FD 式の定式化の概容である。しかし, Seo et al.<sup>7)</sup> では, 適切な値を代入し仮定の FD を得るまでにとどまっているため, 実データを用いてのモデルの再現性については全く議論されていない。さらに, FD の導出にあたっては, 数々の仮定条件を設定することで成立しており, その中には, 実情とは少し乖離した設定をしていると考えられる点が散見される。それは例えば, 以下のような点である。

- 式 (1) のように, 駅での乗車客数 ( $n_p$ ) と停車時間 ( $t_b$ ) に線形関係を仮定している点。  
(単純な線形関係になっているとは考えにくい。実際, 乗降客数の増加に伴い停車時間が非線形的に増加するということが, 中村・田口<sup>15)</sup> や Kim et al.<sup>16)</sup> などの様々な論文で示されている。また, 乗車客数が小さい場合は, 停車時間が一定となっているとも考えられる。)
- 式 (2) のように, 列車走行時には前方列車のみに依存して運行すると仮定している点。  
(実際であれば, 列車間隔が著しく開かないよう後続列車の位置についても配慮し運行していると思われる。)
- (3b) で提示した, 定常状態における列車運行システムが全て満たされるような路線は, 実際には存在しないと考えられる点。

したがって, 提案されている鉄道 FD に対し, 観測データを当てはめることによる現況再現性の検証が必要と言える。そこで, 本研究では 2 通りの手法によって現況再現性の検証を行う。その詳細については 5.(1) で述べることとする。

## 4. データの概要と交通状態変数の設定

### (1) 分析対象

東急田園都市線・二子玉川-渋谷間上り線を対象にすることとした。以下に対象路線をはじめとした検証対象の概要を表-2 に, 同路線の位置図を図-5 に整理する。

表-2 検証対象の概要

対象路線	東急田園都市線
対象区間	二子玉川-渋谷 (上り渋谷方面) 全長: 9.4km (二子玉川-用賀: 1.8km) (用賀-桜新町: 1.3km) (桜新町-駒沢大学: 1.5km) (駒沢大学-三軒茶屋: 1.5km) (三軒茶屋-池尻大橋: 1.4km) (池尻大橋-渋谷: 1.9km)
対象日	平日全 10 日 (2017 年 10 月) ※ (2) にて詳述
対象時間	6:30 - 10:30



図-5 東急田園都市線位置図 (Google マップより加工)

対象区間は, どの隣接駅間距離もおおよそ 1.5km とほぼ一律であり, 特に朝ラッシュ時においては運行間隔も 2~3 分と一律である。この点で, 3.(3b) で列挙した条件のうち, 2), 3) は満たすこととなる。加えて, 渋谷着 7:30~9:00 の時間帯では当該区間を走る列車はすべて各駅停車として運転されるため, 6) の条件も満たすこととなる。しかし, この時間帯のみに絞って解析を進めたところ, サンプル数が過少ゆえに検証が困難となってしまった箇所があったため, 現時点では, 急行列車の運転が行われる時間帯も解析対象に入れている。

### (2) 使用データ

次に, 実際に再現性検証で用いる観測データの概要について述べる。データについては東京急行電鉄株式会社より提供いただいた。データの概要を表-3 に示す。

### (3) 列車運行実績記録を用いた基礎分析

観測データを用いて FD を分析する前に, ここでは列車運行実績記録を用いて, 実際の列車挙動について基礎分析を行う。

2017/10/5 (木) の 8:00-9:00 における列車走行軌跡図を図-6 に掲載する。図-6 からは, 渋谷駅で発生した遅延を受けて, 列車の間隔が詰まり, 遅延元列車の後続列

表-3 本研究で用いるデータ一覧

データ名	内容
(a) 列車運行実績記録	各駅における各列車の発着時刻が秒単位で記録されたデータ 2017年10月2日(月)~2017年10月20日(金)における平日10日間の概ね6:00~11:00が対象
(b) 現地乗降調査結果 (目視による調査)	各駅での列車乗降人数が各列車・各車両ごとに記録されたデータ 2017年10月3日(火)における渋谷着7:11~9:32の列車が対象
(c) ATCコード表	自動列車制御装置(ATC)による制限速度現示が各閉塞ごとに記載されたデータ
(d) 自動改札機データ	各駅での自動改札機入場・出場数が分単位で記録されたデータ 2017年10月2日(月)~2017年10月20日(金)における平日10日間6:00~11:00が対象

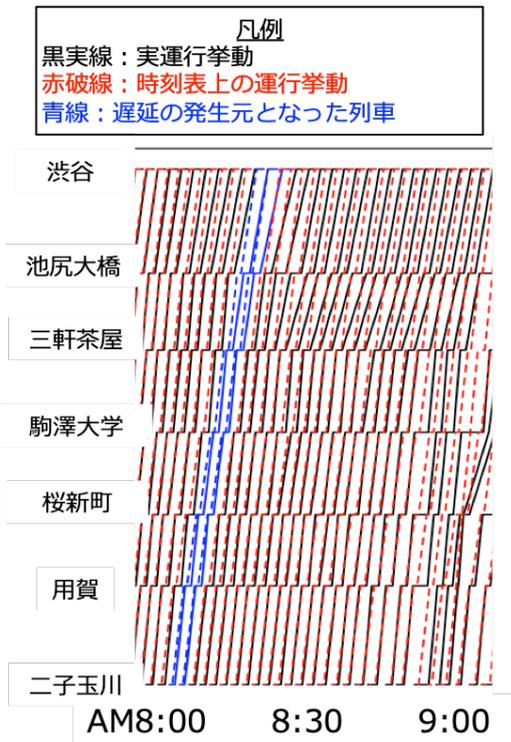


図-6 2017/10/5 (木) における列車走行軌跡図

車群が三軒茶屋-池尻大橋間で著しく走行時間が増大しており、遅延が波及している様子がうかがえる。また、別日の列車走行軌跡図からは、前後列車の間隔を均一にし、各駅・各列車の混雑を平均化するために、「間隔調整」を行なった様子もうかがえた。

以上の考察から、遅延が一度発生すると、各駅間ではそれぞれ局所的な遅延が観測されることが判明したが、巨視的な観点では定常と見なすことができる。

#### (4) 観測データとFD式の各変数・パラメータとの関連づけ

次に、3.(3)で述べたFD式(式(5)、式(6))で必要となる変数及びパラメータに関して、観測データからの

取得方法について、表-4に整理する。3つの変数(列車流率 $q$ 、列車密度 $k$ 、乗客需要 $q_p$ )は、(a)列車運行実績記録及び(d)自動改札機データを用いて算出され、 $k-q$ 平面にその結果をプロットすることでFDのプロットも作成される。これは、FD式を全く介すことなく実運行をそのままFDに表現するということであり、運行上の実績値プロットと見なすことができる。以降では、この手法によって得られる変数(列車流率 $q$ 、列車密度 $k$ 、乗客需要 $q_p$ )を、「交通状態変数実績値」と呼ぶこととする。

#### (5) 交通状態変数実績値の算出

##### a) 列車流率 $q$ 、列車密度 $k$

列車流率 $q$ 及び列車密度 $k$ の算出については、Edieの定義<sup>11)</sup>を適用した。これは、横軸に時間、縦軸に空間(距離)を取った時のタイムスペースダイアグラム(走行軌跡図)を利用し $q, k$ を算出する手法である。以下に、その算出式を示す。

$$k = \frac{\text{総旅行時間 } T(A)}{\text{集計領域の大きさ } |A|} \quad (15)$$

$$= \left[ \frac{\text{veh} \cdot \text{h}}{\text{km} \cdot \text{h}} \right]$$

$$= \left[ \frac{\text{veh}}{\text{km}} \right]$$

$$q = \frac{\text{総旅行距離 } D(A)}{\text{集計領域の大きさ } |A|} \quad (16)$$

$$= \left[ \frac{\text{veh} \cdot \text{km}}{\text{km} \cdot \text{h}} \right]$$

$$= \left[ \frac{\text{veh}}{\text{h}} \right]$$

集計領域 $A$ とは、走行軌跡図上に分析者が任意に設定する矩形領域である。今回は、図-7のように集計領域を設定した。図-7上の橙色で囲まれた矩形領域が、今回設定する集計領域である。この図-7が示す通り、集計

表-4 観測データからの各種変数及びパラメータの取得方法

番号	項目名 [単位]	使用するデータ
(A) 変数		
(A-1)	列車流率 $q$ [veh/h]	(a) 列車運行実績記録
(A-2)	列車密度 $k$ [veh/km]	(a) 列車運行実績記録
(A-3)	乗客需要 $q_p$ [pax/h]	(d) 自動改札機データ
(B) パラメータ		
(B-1)	乗車流率 $\mu_p$ [pax/h]	(b) 現地乗降調査結果
(B-2)	確認時間 $g_p$ [h]	(b) 現地乗降調査結果
(B-3)	最大速度 (自由流速度) $v_f$ [km/h]	(c) ATCコード表
(B-4)	最小車頭時間 $\tau$ [h]	(B-3), (B-5) から算出
(B-5)	最小車頭距離 $\delta$ [km]	(c) ATCコード表
(B-6)	隣接駅間距離 $l$ [km]	時刻表

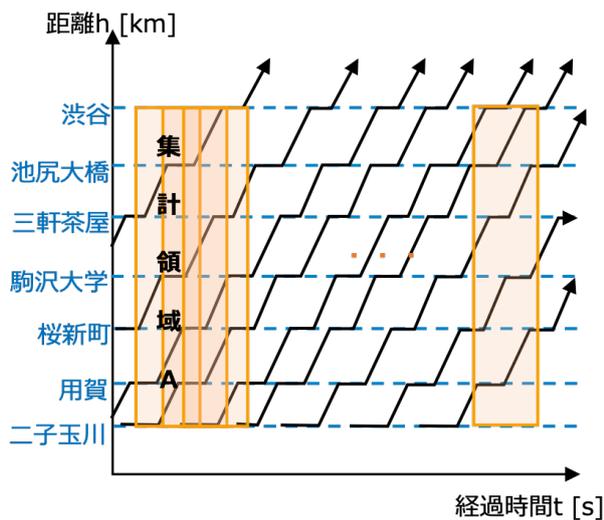


図-7 走行軌跡図(例)と集計領域の設定手法

領域の大きさ  $|A|$  は時間(横)と距離(縦)によって定義されるものである。今回は、この集計領域を10分(横)と二子玉川-渋谷の区間距離9.4km(縦)として設定した。また、それぞれの集計領域の時間(横)は、6:30-6:39, 6:31-6:40, 6:32-6:41...と1分間隔で異なるような形で設定した。つまり、6:30-10:30の解析対象時間内では、232(設定し得る10分の時間幅)個の集計領域が設定されることとなる。

以上の通り、列車運行実績記録から走行軌跡図を描画し、集計領域を設定した上で、式(15)、式(16)を用いることで、 $q, k$ を算出した。しかし、FDはあくまで定常状態に基づいた分析手法であるため、局所的な変動が見られるようなサンプルは除去する必要がある。そこで、以下の式(17)を満たす $q$ のみ抽出することで定常判定を行った。

$$\frac{|q_n - q_{n-1}|}{q_{n-1}} \leq \epsilon \quad (17)$$

ここで、 $q_{n-1}$ : 集計領域  $n-1$  での  $q$ ,  $q_n$ : 集計領域  $n$  での  $q$ ,  $\epsilon$ : 相対誤差である。また、ここでは  $\epsilon = 0.2$  として設定した。

## (6) 乗客需要 $q_p$

乗客需要  $q_p$  は、表-4で記載したように、(d)自動改札機データから1分あたりの乗車人数と降車人数を合算することによって取得した。Seo et al.<sup>7)</sup>では、ここを乗車人数のみと捉えて論じていたが、ここでは乗客需要  $q_p$  を乗降人数と捉えるものとする。

この乗車降車合算値を用いて、(5a)で設定した集計領域に合うよう10分単位に集計し1つのサンプルとしたものを各駅ごとに算出し、最終的には、この各駅における乗客需要  $q_p$  を二子玉川-渋谷間で集計して用いた。

しかし、自動改札機データで記録された数字は、単純に改札機を通過した人数をカウントしているに過ぎないため、上下線の利用者の区別、更に渋谷駅などの他路線乗り換え可能駅では東急田園都市線利用者の区別をする必要がある。そこで、第12回大都市交通センサス(2015年)のマスターデータを用いて按分計算を行い、検証対象である田園都市線上下り方面利用者数(乗車客数と降車客数)を算出した上で使用した。

## (7) 交通状態変数実績値のプロット

(5)で説明した交通状態変数実績値の算出方法に則り、観測データを  $k-q$  平面上にプロットした結果が図-8(a)の通りである。なお、交通状態変数実績値のプロットについては、 $k-q$  平面をメッシュで区切った上で、メッシュ内で複数の乗客需要  $q_p$  の値が観測された場合にはそのメッシュ内での平均値を適用しプロットしている。この集計用の単一メッシュの大きさは、 $q: 1[\text{veh/h}] \times k: 0.1[\text{veh/km}]$  である。

図-8(a)を見ると分かる通り、交通状態変数実績値によるFDプロットでは、区間によって渋滞領域にプロットがなされていることが読み取れる。これより、列車群渋滞が実際に発生しているという事実が定量的に示された。

この図と図-2とを比較すると、臨界点付近における乗客需要低層のプロット及び原点付近における乗客需要高層のプロットは実際の運行上ではないという点も読み取れる。これはそれぞれ、乗客需要が低いにも関わらず、多くの列車を運行させている状況と乗客需要が高いにも関わらず列車を過小に運行させている状況を示すが、このような非効率な運行は、日々の需要動向に鑑みれば、鉄道を運行する鉄道会社側としては、まず行われることはないと言って良い。よって、これらの領域のプロットが見られないというのも、実状に見合った結果とすることができる。

以上が、交通状態変数実績値を実際にプロットした結果より読み取れる点である。次章では、ここで得られた交通状態変数実績値をもとに、鉄道FDの現況再現性の検証を2つの手法に分けて行う。

## 5. 鉄道FDの現況再現性の検証

### (1) 現況再現性の検証手法

まず最初に、2つの再現性検証の手法についてここに詳述する。具体的には、2つの手法によってFD式におけるパラメータ値を設定するというものである。それぞれの手法で得られたパラメータ値をFD式に代入することで、3つの変数(列車流率  $q$ , 列車密度  $k$ , 乗客需要  $q_p$ )を算出し、それを交通状態変数実績値と比較す

(a) 交通状態変数実績値のプロット (b) 工学的な設定値によるプロット (c) キャリブレーション値によるプロット

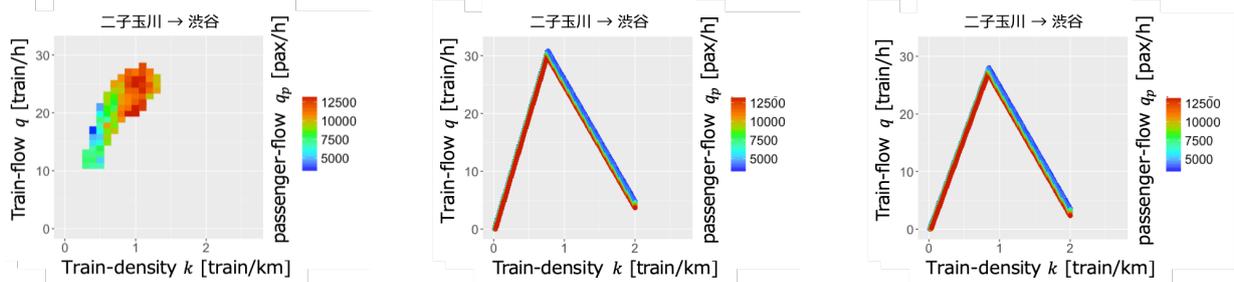


図-8 (a) 交通状態変数実績値, (b) 工学的な設定値, (c) キャリブレーション値によるプロットの比較結果

る。その2つのパラメータ値算出手法は以下の通りである。

- (1) 各パラメータ値の定義に則り、最大限その定義に合うように設定する手法  
(得られるパラメータ値を、以降、「工学的な設定値」と呼ぶ)
- (2) 上記の結果に基づいて、キャリブレーションを行うことにより設定する手法  
(得られるパラメータ値を、以降、「キャリブレーション値」と呼ぶ)

上記(1)の手法による検証については(2)に、(2)の手法による検証については(3)に、それぞれ説明する。

**(2) 工学的な設定値による現況再現性の検証**

工学的な設定値による現況再現性の検証について、観測データを用いた各パラメータ値の工学的な設定基準について述べた後に、交通状態変数実績値と比較をし、現況再現性の検証を行う。

**a) 乗車流率  $\mu_p$ , 確認時間  $g_b$**

乗車流率  $\mu_p$  と確認時間  $g_b$  については、FD 導出時の仮定条件(式(1))で示した通り、駅での乗車客数 ( $n_p$ ) と停車時間 ( $t_b$ ) とが線形関係になるという条件から導出することができる。ここで仮定している状態を図で表すと、図-9 のようになる。これより、駅での乗降客数  $n_p$  と停車時間  $t_b$  との関係で導出される直線の式に対して、傾きが  $1/\mu_p$  に相当し、縦軸切片が  $g_b$  に相当することがわかる。

なお、4.(6) で述べたように、ここでも乗車についてのみ考えるのではなく、乗車と降車を一体として考えることとする。つまり、 $\mu_p$  は、以降では乗降流率と読み替え、 $n_p$  は列車に対する乗降客数と読み替えるものとする。よって、乗降流率  $\mu_p$ , 確認時間  $g_b$  の導出は、駅での乗降客数  $n_p$  と停車時間  $t_b$  について回帰分析を行い、回帰直線の式を求めることで推定される。そこで、表-3 の (b) 現地乗降調査結果のデータを用いて、二子玉川-渋谷の全駅を対象として回帰分析を行った。こ

の回帰分析で得られた散布図を図-10 に示し、定量的な結果を表-5 に示す。

表-5 回帰分析結果

決定係数	0.58
回帰直線	$y = 0.01302x + 65.09933$
乗降流率 $\mu_p$	276.498 [pax/h]
確認時間 $g_b$	0.01808 [h]
サンプル数 <sup>1</sup>	350

<sup>1</sup> 桜新町駅における通過待ち列車のサンプルは除去した  
また、四分位法により外れ値除去を行った

図-10 より、特に 600pax 以下でサンプルのばらつきが見られる。これは、需要の規模が異なる各駅を区別することなく、一緒のサンプルとして回帰分析してしまったためであると考えられる。これに対応するには、各駅に分けて回帰分析を行い、それぞれの推定結果を各駅のパラメータ値として設定することが望ましいとも考えられるが、その場合サンプル数が過小となり、こちらも不十分な解析となってしまう(実際に各駅ごとに分割した回帰分析も行なった)。そのため今回は、このように全駅分のサンプルを用いて一つの回帰分析を行うことでパラメータ値を推定した。

また、表-5 の解析結果を見ると、決定係数はそれほど高くはないものの、乗降流率  $\mu_p$  に関しては、実状に合致した値と言える。なぜなら、以下のように単位変

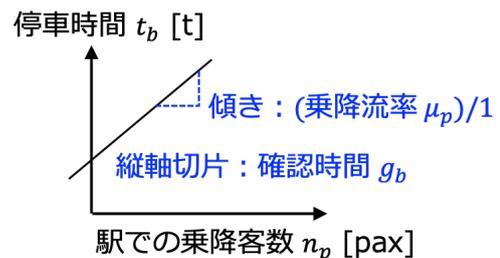


図-9 駅での乗降客数  $n_p$  と停車時間  $t_b$  との関係

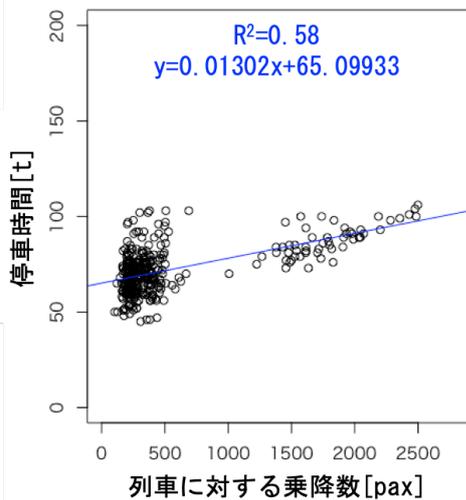


図-10 散布図

換をしていくと

$$276497.7[\text{pax}/\text{h}] \cong 76.8[\text{pax}/\text{s}] \cong 1.9[\text{pax}/\text{s} \cdot 1 \text{ ドア}] \quad (18)$$

となり、これはつまり、列車の1ドアに対して毎秒1.9人の人が列車を乗降しているという意味となる。一般的に、通勤列車のドアは一度に2人が乗降できるだけの幅を備えているため、単純に考えれば毎秒2人が乗降できるものと推測される。ゆえに、乗降流率 $\mu_p$ に関しては、当てはまりの良い値が推計されたと言える。

また、確認時間 $g_b$ の値が $0.01808[\text{h}] = 65.1[\text{s}]$ と、確認時間としては過大と見られるが、この $g_b$ はあくまでも線形式の定数項という位置付けであり、実際には駅での安全確認時間だけでなく加減速に要する時間も含有したパラメータである。そのため、実状から大きく乖離しているわけではないということに注意されたい。

#### b) 最大速度 $v_f$

最大速度 $v_f$ は、表-3のうち(c) ATCコード表を用いて算出する。この表には、各閉塞ごとに自動列車制御装置(ATC)による制限速度が記載されており、求めるべき最大速度(自由流速度)の値も付記されている。

ここで、閉塞とは、線路上でいくつかに区切られた単区間のことで、1つの閉塞に2つ以上の列車進入をさせないことで、前後列車との衝突を防止し、安全を確保している。今回用いたATCコード表のイメージとして、表-6を掲載する。

表-6中3行目には、前方列車と十分な距離がある場合の制限速度、つまり最大速度(自由流速度)が示されている。4行目以降は、前方列車に接近している場合の制限速度及び信号現示を、前方列車が在線する閉塞位置で類別して示している。

表-6 ATCコード表のイメージ

番号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	...
閉塞長 [m]	150	210	130	180	200	180	...
最大速度 [km/h]	65	65	80	70	70	70	...
					▲	▲	...
					II	II	...
			▲	II	I	I	...
		▲	II	I	20	20	...
	▲	II	I	20	45	45	...

【信号現示】

- ▲：列車が当該閉塞に在線していることを表す
- II：当該閉塞に列車が進入した場合、即座に非常ブレーキが作動
- I：当該閉塞に列車が進入した場合、即座に常用最大ブレーキが作動

この表-6のうち、最大速度 $v_f$ の算出にあたっては、2, 3行目を用いる。また、二子玉川-渋谷の全区間を対象として求めるのではなく、各駅区間ごとに求めるものとした。区間 $k$  ( $k = 1, 2, \dots, 6$ )の最大速度 $v_f^k$ は、各閉塞 $n^k$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ )の距離( $d_n^k$ )を考慮した重み付き調和平均によって算出した。閉塞 $n^k$ での最大速度を $v_f^{k,n}$ とすると、算出式は、

$$v_f^k = \frac{\sum_{n=1}^N d_n^k}{\sum_{n=1}^N \frac{d_n^k}{v_f^{k,n}}} \quad (19)$$

と表せる。

区間ごとに算出された $v_f^k$ を用いて、最終的には二子玉川-渋谷間として平均値を算出し、これをパラメータとして用いた。

#### c) 最小車頭距離 $\delta$

最小車頭距離 $\delta$ についても、表-3における(c) ATCコード表を用いて算出する。使用するのは、表-6のうち4行目以降の列車在線閉塞によって類別された制限速度表である。

表-6が示す通り、列車の在線位置によって、最小車頭距離(停止時の安全距離)は変動する。そのため、考えられる全てのパターンを加味した上で各区間での最小車頭距離 $\delta$ を算出する必要がある。そこで、少なくとも”I”信号を現示している閉塞内には列車は進入せず、また、進入したとしても当該閉塞入り口で必ず停止すると仮定を置き算出することとした。

当パラメータについても、区間ごとに算出した。区間 $k$  ( $k = 1, 2, \dots, 6$ )の最小車頭距離 $\delta^k$ は、あるパターン $p$  ( $p = 1, 2, \dots, P$ )において”II”信号を現示している閉塞の閉塞距離( $d_{p,II}^k$ )、”I”信号を現示している閉塞の閉塞距離( $d_{p,I}^k$ )、”I”信号が現示されない最初の閉塞の閉塞距離( $d_{p,0}^k$ )を用いて

$$\delta^k = \frac{\sum_{p=1}^P d_{p,0}^k}{\sum_{p=1}^P \frac{d_{p,0}^k}{(d_{p,I}^k + d_{p,II}^k)}} \quad (20)$$

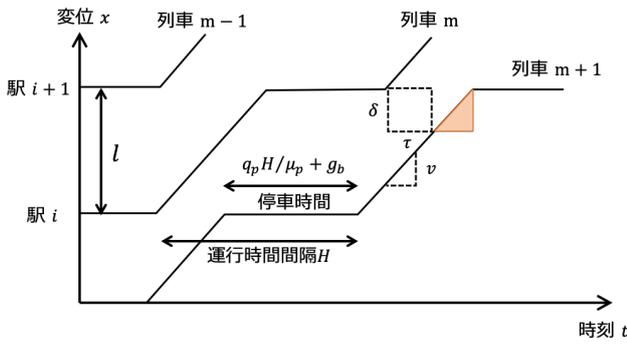


図-11  $\tau$  及びその他パラメータの図形的関係

と算出した。これはすなわち、各パターン  $p$  における  $d_{p,0}^k$  を考慮した、 $d_{p,I}^k$  と  $d_{p,II}^k$  の和の重み付き調和平均を表す。

区間ごとに算出された  $\delta^k$  を用いて、最終的には二子玉川-渋谷間として平均値を算出し、これをパラメータとして用いた。

#### d) 最小車頭時間 $\tau$

最小車頭時間  $\tau$  は、データから直接的に値を算出する訳ではなく、他のパラメータを用いて間接的に算出する。その算出に用いる関係図については、図-11を参照されたい。

図-11中に示した橙色の三角形に関する図形的関係から

$$v_f = \frac{\delta}{(\text{列車 } m \text{ の到着時刻}) - (\text{列車 } m-1 \text{ の出発時刻}) - \tau} \quad (21)$$

という式が成り立つ。この式を用いて  $\tau$  を算出することができる。当パラメータについても、区間ごとに算出された  $\tau^k$  を用いて、最終的には二子玉川-渋谷間として平均値を算出し、これをパラメータとして用いた。

#### e) 隣接駅間距離 $l$

隣接駅間距離は、時刻表に掲載されている営業キロを参照して定めた。なお、当パラメータは(3)で行うキャリブレーションでは固定値として扱うものとする。

#### f) 各種パラメータ設定値

以上で述べたそれぞれの算出手法によって、各駅間における各パラメータの工学的な設定値は、表-7のように算出された。

#### g) FD プロットに着目した現況再現性の検証

工学的な設定値によるFDプロットを図-8(b)に示す。工学的な設定値によるFDプロットでの乗客需要は、交通状態変数実績値でプロットした各メッシュ平均値としての乗客需要値に対応したものである

図-8での(a)及び(b)の比較結果から、特に双方の臨界値について照合すると、交通状態変数実績値による

FDと工学的な設定値によるFDがあまり合致していないという点を読み取れる。具体的には、交通状態変数実績値によるFDと比べて、工学的な設定値によるFDは、全体的に左の領域にずれてプロットされている。しかし、これはあくまで視覚による比較であるため、厳密に定量的な比較を次のh)で行う。

#### h) 列車流率 $q$ の値に着目した現況再現性の検証

実績値としての列車流率  $q$  ( $q$ -observed) と工学的な設定値により算出される列車流率  $q$  ( $q$ -Engineering) の相関を図-12(1)に示す。

図-12が示すように、一定程度の当てはまりの良さは得られていることがわかる。しかし、概ねの傾向として、乗客需要が高い場合には過小評価をしており、乗客需要が低い場合には過大評価をしている。

また、別の検証として、二子玉川-渋谷の各駅間で区切った場合の検証も行ったが、当てはまりは著しく悪かった。この要因としては、区間全体で巨視的に分析した方が、実運行における局所的な変動が均一化され、モデルによる出力結果と実状との誤差が小さくなったためと考えられる。つまり、単一区間で区切った場合の分析では、当該範囲にはせいぜい3本程度の車両(列車)しか存在し得ないが、区間を広げれば存在車両台数が増えるため誤差が小さくなったということである。

元々 Seo et al.<sup>7)</sup> で提唱された鉄道FDは、このような広い範囲における分析を念頭に置いたモデル体系であったため、このように巨視的な分析でより良い結果が得られた点は理にかなっていると言ったことができ、これは自動車交通で見られる傾向と同様である<sup>6)</sup>。尚、各駅間で区切った場合の検証結果については、付録にて示す。

#### i) 考察

以上の検証結果から示されたように、工学的な設定値による現況再現性は、ある一定程度の当てはまりの良さは得られたものの、完全に一致するものではない。このような隔たりが生じた原因としては、以下の点が考えられる。

- (A) 乗降流率  $\mu_p$  と確認時間  $g_b$  の推計誤差が影響したという点
- (B) 後続列車との間隔調整処理が考慮されていない点

表-7 各パラメータの工学的な設定値

	設定値
乗降流率 $\mu_p$ [pax/h]	276498
確認時間 $g_b$ [h]	0.018
最大速度 $v_f$ [km/h]	77.3
最小車頭時間 $\tau$ [h]	0.00812
最小車頭距離 $\delta$ [km]	0.445
隣接駅間距離 $l$ [km]	1.6

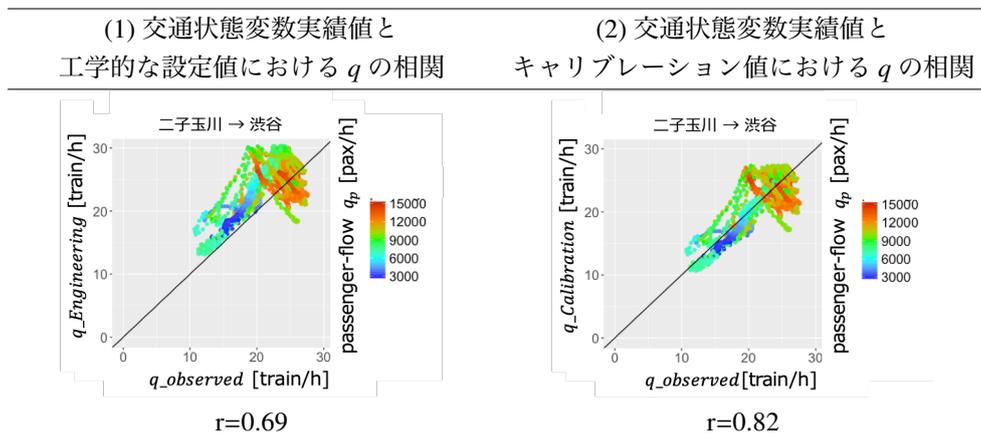


図-12 実績値での列車流率  $q$  と各設定値における列車流率  $q$  の相関

(C) 運行時間間隔が、実際には一律とはなっていない時間帯が存在するという点

(D) 乗客需要  $q_p$  算出の際に行った、大都市交通センサスを用いた按分計算が不適切であるという点

(A) は、(2a) で指摘した通りである。表-5 で示した決定係数はそこまで高い値とは言えない点から、推計誤差が生じていると考えられる。

(B) は、FD 立式での仮定条件 (3.3a) における、「前方列車の挙動のみで運行速度が定められる」という条件に起因するものである。4.3 でも述べた通り、実運行では、遅延が発生した際、駅などで停車時間を通常より長く取り、後続列車との間隔が著しく開かないよう配慮している。この点の表現は、本 FD では実現されないため、少なからず誤差要因となっている可能性がある。

(C) については、定常運行時の交通状態で仮定した条件 (3.3b) に関連するものである。ここでは、「すべての列車の運行間隔時間が等しい」としていたが、今回は、運行時間間隔が 2~3 分程度となるピーク時と、5 分以上となるオフピーク時を合わせて対象とした。これは、対象時間をピーク時にのみ絞った場合、サンプル数が足りず検証が困難となってしまったためである。両時間帯において、その運行時間間隔には顕著な差はないものの、この点も少なからず誤差要因の一つとなっている可能性がある。

(D) での按分計算は、各駅の自動改札機データから田園都市線上市列車を推計するために行ったものである。自動改札機の記録では、もちろん自動改札機を通過しない利用者のデータは取られないため、改札を bypass せずに他路線へ乗り換える利用者数を得ることができない。そのため、大都市交通センサスの集計データとの関連付けるのが難しく、多少荒い按分計算となってしまった。しかし、他の代替案が見つからないため、この点は改良が難しい点である。

以上に述べた通り、要因が複数存在し得る点に鑑みると、ある単一のパラメータだけに誤差が生じているということは考えにくく、少なくとも複数のパラメータに誤差が生じていると考えられる。このような、複数のパラメータの関係性による誤差を検討することも念頭に置き、次節では、本節で示した検証結果を踏まえて、キャリブレーション値による現況再現性の検証を行う。

### (3) キャリブレーションによる現況再現性の検証

次に、2 つ目の現況再現性の検証として、本節ではキャリブレーションについて説明する。最初に、キャリブレーションの意義や手法等について整理した後、(2) と同様に得られた値を交通状態変数実績値と比較し、現況再現性の検証を行う。

#### a) キャリブレーションの意義と対象パラメータ

現況再現性の検証の 2 つ目の手法として、キャリブレーションを行うが、これは、(3) で述べた FD 式及びその導出で設けた仮定条件が正しいとした時の最も当てるはまりの良い最適なパラメータ値を求めるとのことである。つまり、キャリブレーションを行う意義としては、単に最適値を求めるとのことだけでなく、ここで得られる最適値と (2) で算出した工学的な設定値とを比較することで、仮定条件のどの点が不適切であったために、(2) の手法での現況再現性が低くなってしまったという点を詳細に把握するという点も挙げられる。そのような点を念頭に置きながら、本節での説明を進めて行く。

キャリブレーションを行う対象のパラメータは、不変な値である隣接駅間距離  $l$  を除いた表-8 に示す 5 つとする。

#### b) 最適化問題の定式化と推定条件

今回設定する最適化問題は、交通状態変数実績値における列車流率と FD 式を通して得られる列車流率の

表-8 キャリブレーションの対象となるパラメータ

番号	パラメータ
(B-1)	乗降流率 $\mu_p$ [pax/h]
(B-2)	確認時間 $g_b$ [h]
(B-3)	最大速度 (自由流速度) $v_f$ [km/h]
(B-4)	最小車頭時間 $\tau$ [h]
(B-5)	最小車頭距離 $\delta$ [km]

誤差の二乗和が最小となるような値を求める最小二乗問題である。具体的には、以下の式を満たす  $\mathbf{x}$  を求めることと等価となる。

$$\min_{\mathbf{x}} \sum_{i=1}^N \{Q_x(k, q_p^i) - q^i\}^2 \quad (22)$$

ここで、 $\mathbf{x}$  は、キャリブレーション対象の5つの変数からなるベクトルを表す。つまり、

$$\mathbf{x} = (\mu_p, g_b, v_f, \tau, \delta) \quad (23)$$

ただし、 $\mu_p > 0, g_b > 0, v_f > 0, \tau > 0, \delta > 0$

と定義される。そして、 $q^i$  は (5) - (7) で求めた交通状態変数実績値のうちの列車流率である。一方、 $Q_x(k, q_p^i)$  は、式(5)で示したFD式で算出される列車流率である。また、推定に当たっては初期値を設定する必要があるが、これは表-7で示した工学的な設定値を踏まえて、一律に以下の値とした。また、各パラメータ値の上限値・下限値も適宜設定し、推定を行った。

#### c) キャリブレーションの手法

表-8が示す通り、今回のキャリブレーションは、5変数による非線形関数の最適化問題を解くということになり、かつ、巨大な有限集合から最適値を求めるということとなる。そこで、今回その最適化の手法として採用するのは、SA法 (Simulated Annealing, 焼きなまし法) である。通常最適化では、常に改良方向に解を探索することによって局所的な最適解に陥ることがあるが、当手法は、ある確率で改悪方向にも解を探索することによって、局所的な最適解に陥る領域から脱出し、適切な最適解を得ることができる。この利点から、この手法は大域的最適化問題に対してよく用いられ、今回の最適化にも適する手法と考えられる。

#### d) 算出された最適値

今回のキャリブレーションによって算出された最適値及び相関係数  $r$  の値を以下の表-10に示す。

表-9 最適化問題で設定した初期値

	初期値
乗降流率 $\mu_p$ [pax/h]	250000
確認時間 $g_b$ [h]	0.010
最大速度 $v_f$ [km/h]	65.0
最小車頭時間 $\tau$ [h]	0.00525
最小車頭距離 $\delta$ [km]	0.500

表-10 キャリブレーションによって得られた最適値

	設定値
乗降流率 $\mu_p$ [pax/h]	250000
確認時間 $g_b$ [h]	0.023
最大速度 $v_f$ [km/h]	64.5
最小車頭時間 $\tau$ [h]	0.00547
最小車頭距離 $\delta$ [km]	0.456
相関係数 $r$	0.82

表-10から、乗降流率  $\mu_p$  及び最大速度  $v_f$  についてはほぼ初期値と変わらない値が算出された。一方で、確認時間  $g_b$  については工学的な設定値よりも大きな値が、最小車頭時間  $\tau$ 、最小車頭距離  $\delta$  については工学的な設定値よりも小さな値が算出された。

キャリブレーションは、初期値や上限値下限値などの条件を様々に変化させて何通りか行ったが、相関係数  $r$  が一定以上の値になっているものであり、かつ、算出された最適値が最低限実状に合っているものを選出し、表-10に掲載している。

#### e) 現況再現性の検証

キャリブレーション値によるFDプロットを図-8(c)に示す。図-8での(a)及び(c)の比較結果では、工学的な設定値との変化が視覚的には不明であるので、次に、交通状態変数実績値により算出される列車流率  $q$  (q\_observed) とキャリブレーション値により算出される列車流率  $q$  (q\_Calibration) の相関を図-12(2)に示す。

図-12の(1)と(2)を比較するとわかる通り、工学的な設定値との比較結果(図-12)よりも、大幅に当てはまりが良くなったことが分かる。しかし、乗客需要が低い領域については当てはまりが良いものの、乗客需要が高い領域については列車流率  $q$  が過小評価されている傾向にある。

#### (4) 考察

以上(2)及び(3)で述べた2種類の検証結果から考えられることとして、以下の点を列挙する。

- (A) 乗降流率  $\mu_p$  と確認時間  $g_b$  の導出の際に置いた仮定は不適切であるという点
- (B) 当FDは最小車頭距離  $\delta$  の値に大きく左右されている可能性が高く、かつその値は小さいほど当てはまりが良くなるという点

(A)については、(2a)で述べた通りである。

(B)については、いくつかキャリブレーションを繰り返す中で判明した点である。実は、いくつかのキャリブレーションを繰り返す中で、この  $\delta$  の下限値を少しでも大きくすると、途端に当てはまりが悪化するという傾向が見られた。さらに、どの推定においても、 $\delta$  は設定した下限近傍の値が最適値として算出された。

これらのことから、 $\delta$  はFDにおける支配パラメータ

となっており、かつその値は小さければ小さいほど実状との当てはまりが良くなるという点が示唆された。今回のキャリブレーションでは、乗客需要の高い領域の当てはまりがわずかに良くなっているが、これは $\delta$ の最適化に起因するものと考えられる。

## 6. 動的モデルに基づく高頻度運行都市鉄道システムのシミュレーション

ここでは、5.(3)でのキャリブレーション結果を踏まえ、3.(4)で紹介した動的モデルを分析対象区間である二子玉川－渋谷間に適用させ、列車運行システムのシミュレーションを行い実状と比較する。

### (1) シミュレーション概要

今回のシミュレーションを行う上での設定を表-11に整理する。

前述したように、当シミュレーションはキャリブレーション結果を用いるため、FDに代入する各パラメータ値は表-10中の値となる。

このとき、3.(4)で列挙した変数群は、今回のシミュレーションでは以下のように書き改めることができる。

- $a(t)$ : 時刻  $t$  における列車の二子玉川駅への出発流率
- $a_p(t)$ : 時刻  $t$  における乗客の二子玉川－渋谷駅への到着流率 (列車乗車前)
- $d(t)$ : 時刻  $t$  における列車の渋谷駅への到着流率
- $d_p(t)$ : 時刻  $t$  における乗客の二子玉川－渋谷駅への到着流率 (列車乗車後)

二子玉川－渋谷という区間内では、列車が発生・消滅することはないものの、乗客には発生 (途中駅乗車)・消滅 (途中駅降車) があるため、 $a_p(t)$ 、 $d_p(t)$  の定義については、3.(4)で示したものと若干の相違が生じている。

### (2) 使用データ

今回のシミュレーションで入力値として与えたのは、 $a(t)$  及び  $a_p(t)$  である。これらの値を取得するのに使用した観測データについては、表-12の通りである。

$a_p(t)$  取得に使用した (b) 現地乗降調査結果は、列車の運行時刻に合わせて記録されているため、適宜単位時間あたりの値に換算した上で算出した。また、上記  $a_p(t)$  の説明での「二子玉川駅での到着流率」とは、二

表-11 シミュレーションの概要

対象区間 (システムの領域)	二子玉川－渋谷 (上り渋谷方面)
対象日	2017年10月3日 (火)
対象時間	7:15 - 9:15
単位時間	1秒

表-12 シミュレーションでの入力値とその取得に使用したデータ

項目名 [単位]	使用するデータ
$a(t)$ [veh/s]	(a) 列車運行実績記録
$a_p(t)$ [pax/s]	(a) 列車運行実績記録 及び (b) 現地乗降調査結果

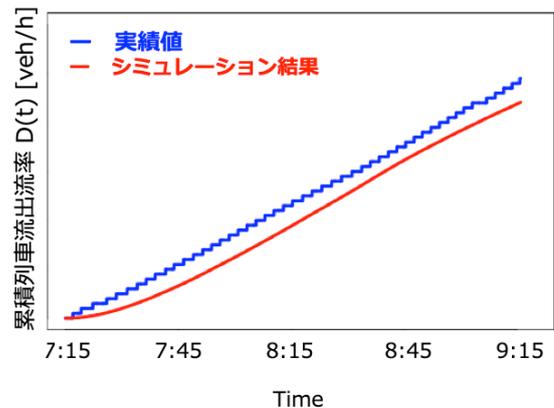


図-13 渋谷駅における累積列車流出流率  $D(t)$

子玉川駅のホームから乗車する乗客だけでなく、二子玉川駅到着時に車内に乗車している乗客も含めるため、その乗客数についても合わせて算出した。

### (3) シミュレーション結果

上記の条件の下、渋谷駅における累積列車流出流率  $D(t)$  について、実績値とマクロモデルによって与えられる値とを比較した結果が図-13の通りである。図中では、前者の量については青実線で、後者の量については赤実線で示している。

図-13からは、両者の累積列車流出流率  $D(t)$  の増加傾向は概ね合致していることが分かる。シミュレーションによる結果が過小推計されているが、これはキャリブレーション値における現況再現結果 (図-12 (2)) において、過大推計誤差よりも過小推計誤差がより強く影響した結果と考えられる。

また、分析終了時での累積本数については、およそ列車5本分の誤差が生じている。これは、つまるところ、(図-12 (2)) でのキャリブレーション結果における相関係数  $r = 0.82$  という実績値との乖離が影響しているものと考えられ、今回の誤差要因についても、結局はキャリブレーションによる現況再現性の検証で列挙した内容に帰着するものと考えられる。

さらに、図-13では、特に7時45分頃から両累積量の乖離が大きくなり始め、その後8時15分から8時45分にかけて乖離が徐々に小さくなっている。このように両累積量の乖離が一時的に大きくなりその後緩やか

になる7時45分から8時45分という時間は、当該対象区間（二子玉川－渋谷）において朝ラッシュのピークが始まりその後収まるという流れに相当するものである。

この時間帯とピークの対応については、東急電鉄<sup>17)</sup>が公表している資料とも合致する（二子玉川発7時43分発から8時12分発の列車が特に混雑し、その後の列車では混雑が緩やかになることを示している）。

このように、特に乗客需要が高い時に累積列車流出率  $D(t)$ （累積列車本数）が過小推計されている傾向は、5.(3)e)で述べたように図-12(2)で見られる傾向とも一致するため、このシミュレーション結果は順当であると言える。今回のシミュレーションは、遅延が比較的少ない日をサンプルとして行ったが、遅延の規模が大きくなるにつれて、マクロモデルによる結果と実状との誤差は上下する可能性がある。

#### (4) 当シミュレーションの活用方針

当シミュレーションにおいて概ねの当てはまりの良さを得たという事実は大きく、需給の変動を表現できるこのマクロモデルの活用は大いに期待できる。その最たるものとしては、様々な遅延対策効果の評価への活用である。これは、1.(2)でも述べた通り、本研究の目的の一つともなっていたものである。

具体的には、当該マクロモデルに内在するFDのパラメータ値を様々に変化させることで、図-13で示した列車累積図が変化することを利用する。例えば、ある遅延対策の実施状態をパラメータ値を増減させることでモデルに反映し、それによって描画される列車累積図と現状での列車累積図を比較する。これにより様々な遅延対策の効果が、それぞれの累積図同士をいかに近似できるかという点に着目することで評価できると考えられる。

各パラメータを変化させることで評価することができる遅延対策については、表-13に整理する。

上記の各遅延対策のうち、1, 2で挙げた対策は遅延が実際に発生した後にその波及を抑制するための対策である。一方で、3, 4で挙げた対策は、遅延の発生を未然に防ぐための対策である。このように、シミュレー

表-13 各パラメータで評価可能な遅延対策

パラメータ	遅延対策
1 乗客需要 $q_p$	駅での入場規制
2 乗降流率 $\mu_p$ , 確認時間 $g_b$	円滑な乗降促進を目的としたアナウンスの実施や駅係員の増員 ホームドアの設置
3 最大速度（自由流速度） $v_f$	信号制御, 制限速度の改良
4 最小車頭時間 $\tau$ , 最小車頭距離 $\delta$	移動閉塞の導入

ションを用いることで、遅延の発生前後両面での遅延対策の効果を評価することができる。

## 7. 結論と今後の課題

本研究では、様々な混雑に起因する列車遅延現象の適切な把握と各遅延対策の評価を可能とするための都市鉄道におけるFundamental Diagram, 及びそれを援用したマクロな高頻度鉄道運行モデルを、観測データを用いて検証し、理論モデルの妥当性について考察した。具体的には、Seo et al.<sup>7)</sup>で提唱されたモデルの現況再現性の検証を2通りの手法で行なった。まず1つ目の手法としては、観測データを用いてSeo et al.<sup>7)</sup>で提唱されたFDに含まれる各種パラメータを可能な限り定義に則り工学的に設定することで、現況再現性の検証を行う手法である。2つ目の手法は、その検証結果を踏まえ、キャリブレーションに基づく鉄道Fundamental Diagramのパラメータ推定を行い、現況再現性の検証を行うというものである。

前者の手法で設定したFDは、3つの交通状態変数実績値である列車流率  $q$ , 列車密度  $k$ , 乗客需要  $q_p$  との比較の結果、ある程度の当てはまりの良さは確保したものの、推計誤差が残っていることが確認された。また、後者の手法で設定したFDは、3つの交通状態変数実績値である列車流率  $q$ , 列車密度  $k$ , 乗客需要  $q_p$  との比較の結果、前者よりも当てはまりの良さは改善されたものの、完全に実状と合致するものとはならなかった。その主な原因としては、乗降流率  $\mu_p$  と確認時間  $g_b$  の推定誤差が挙げられた。いずれにせよ、鉄道FDにより様々な要因で発生している遅延現象を近似的にある程度の精度で表現できることが確認された。その他、最小車頭距離  $\delta$  についてもFDと実状との誤差要因に少なからず含まれる可能性がある点も示され、工学的な設定値として与える際には、その算出方法を再考する必要があることが示唆された。

そして最後に、上述のキャリブレーション結果を用いて動的モデルに基づく高頻度運行都市鉄道システムのシミュレーションを行なった。累積列車流出率について見た結果としては、全体的に過小推計をされていることがわかったものの、概ねの傾向は実績値と合致するものであった。

本研究の課題としては、モデルの更なる精緻化が挙げられる。具体的には、現在置いている仮定条件を実状に即す形で緩和させることである。また、上記で述べた乗降流率  $\mu_p$  と確認時間  $g_b$  の推定誤差についても、回帰分析を行なった際のデータセットを実状に鑑みて取舍選択し分析し直すということで緩和されるものと考えられる。また、実務において工学的な設定値とし

て鉄道FDを構築する場合、最小車頭距離 $\delta$ の設定手法についても再考する必要がある。最小車頭距離 $\delta$ は、現時点では区間ごとに平均値を取ることによって算出しているが、この点を別の算出方法にすることで、工学的な設定値として求めた場合に、より実状に近い値を算出することができると考えられる。

以上の課題を解決し、ある程度モデルの精緻化が完了した場合には、動的モデルに基づく鉄道システムシミュレーションを行い、最終的な現況再現性について確認する必要がある。この段階である程度の再現性が確保できた場合には、様々な遅延対策効果の分析が可能となり、より鉄道FDモデルの実用性が向上するものと考えられる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(B)「高頻度運行都市鉄道システムの統合解析モデルの構築」(代表：福田大輔，課題番号：17H03320)からの支援を受けて行われた。また、本研究を行うに当たり、東急電鉄株式会社より貴重なデータ等をご提供頂いた。ここに記して感謝の意を表します。なお、本論文で示した見解と含まれ得る誤りについては、著者らのみが責任を負います。

付録 本論文で示した検証結果は、全て二子玉川-渋谷間を1つの分析対象区間としたものであった。図-14に、図-12と同様の条件での検証を各駅間で分けて行なった場合の結果を示す。

5.(2)h)でも述べた通り、Seo et al.<sup>7)</sup>で提唱された鉄道FDは、二子玉川-渋谷間のような広範囲での分析を念頭に置いたモデル体系であったため、各駅間という狭い範囲で分析を行なったところ、図-14に示すように、相対的に当てはまりの悪い結果となった。

## 参考文献

- 1) 国土交通省交通政策審議会：東京圏における今後の都市鉄道のあり方について(答申)，<http://www.mlit.go.jp/common/001126948.pdf>, 2016.
- 2) 瀬尾亨，和田健太郎，福田大輔：高頻度鉄道システムの効率性解析のためのFundamental Diagramの提案，土木計画学研究・講演集，Vol. 53，pp. 1780-1789，2016.
- 3) 仮屋崎圭司，日比野直彦，森地茂：列車間隔に着目した運行遅延に関するシミュレーション分析，土木学会論文集D3(土木計画学)，Vol. 67，No. 5，pp. I-1001-I-1010，2011.
- 4) 岩倉成志，高橋郁人，森地茂：都市鉄道の遅延連鎖予測のためのエージェントシミュレーション：田園都市線および半蔵門線を対象に，運輸政策研究，Vol. 15，No. 4，pp. 31-40，2013.
- 5) 和田健太郎，吉相俊，赤松隆，大澤実：高密度鉄道ダイヤにおける列車集積化を抑制する運行制御方策，土木学会論文集D3(土木計画学)，Vol. 68，No. 5，pp. I-1025-I-1034，2012.
- 6) Geroliminis, N. and Daganzo, C. F.: Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experi-

mental findings, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 42, No. 9, pp. 759-770, 2008.

- 7) Seo, T., Wada, K. and Fukuda, D.: Fundamental diagram of rail transit and its application to dynamic assignment, *arXiv:1708.02147* (<https://arxiv.org/abs/1708.02147>) 2017.
- 8) Newell, G.: A simplified car-following theory: a lower order model, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 36, No. 3, pp. 195-205, 2002.
- 9) Lighthill, M. and Whitham, G.: On kinematic waves. ii. a theory of traffic flow on long crowded roads, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 229, No. 1178, pp. 317-345, 1955.
- 10) Richards, P.: Shock waves on the highway, *Operations Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 42-51, 1956.
- 11) Edie, L.: Discussion of traffic stream measurements and definitions, in almond, j.ed., *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, pp. 139-154, 1963.
- 12) Merchant, D. K. and Nemhauser, G. L.: A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problems, *Transportation Science*, Vol. 12, No. 3, pp. 183-199, 1978.
- 13) Carey, M. and McCartney, M.: An exit-flow model used in dynamic traffic assignment, *Computers & Operations Research*, Vol. 31, No. 10, pp. 1583-1602, 2004.
- 14) Daganzo, C.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 41, No. 1, pp. 49-62, 2007.
- 15) 中村幸史，田口東：通勤電車運行スケジュールにおける遅延計算モデルの構築，日本オペレーションズリサーチ学会2004年春季研究発表会アブストラクト集，pp. 142-143，2004.
- 16) Kim, K. M., Hong, S.-P., Ko, S.-J. and Kim, D.: Does crowding affect the path choice of metro passengers? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 77, pp. 292-304, 2015.
- 17) 東急電鉄資料：オフピーク通勤・通学のお願い，2018. <https://www.tokyu.co.jp/ekitown/pdf/ukai/rail-dt-futako-tamagawa.pdf/>.

(2019. 10. 3 受付)

(1) 交通状態変数実績値と  
工学的な設定値における  $q$  の相関

(2) 交通状態変数実績値と  
キャリブレーション値における  $q$  の相関

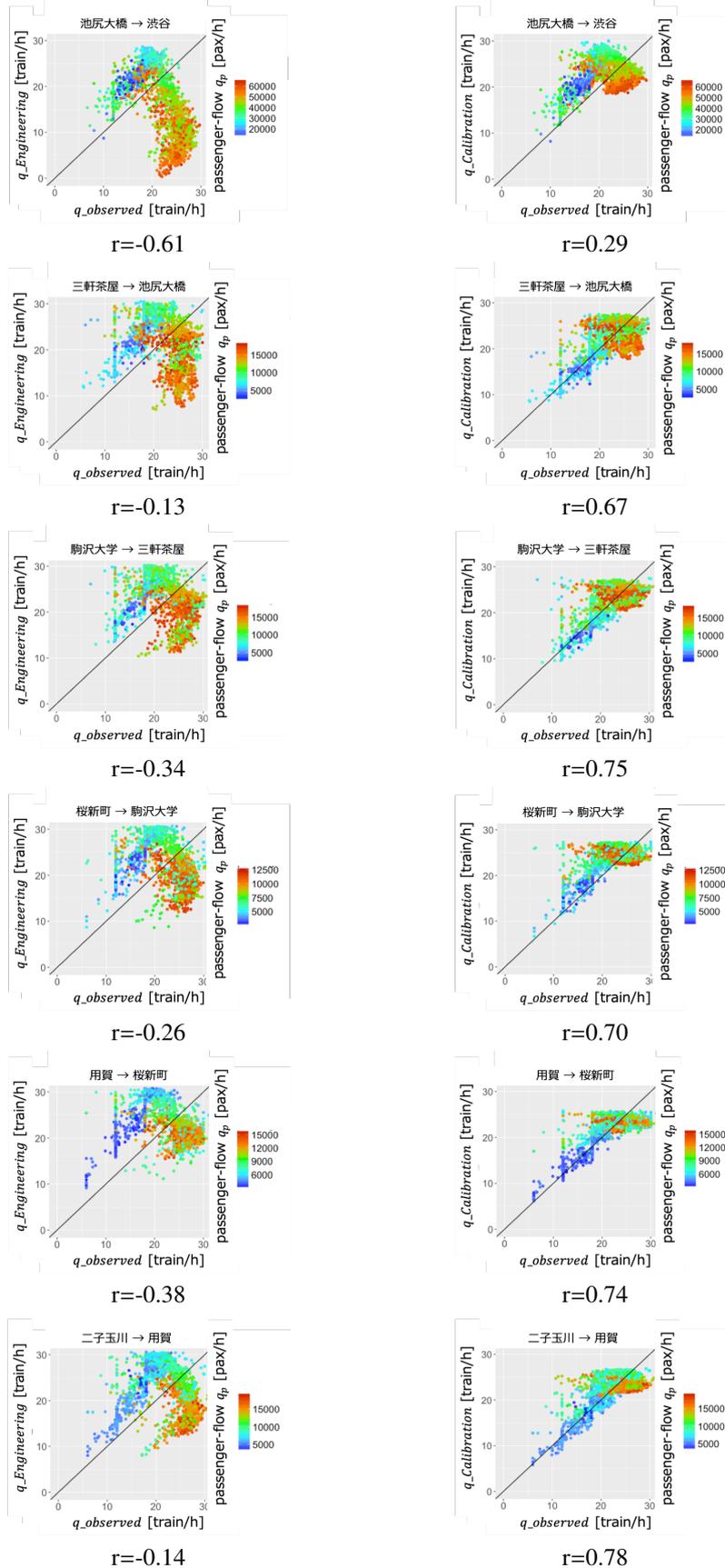


図-14 実績値での列車流率  $q$  と各設定値における列車流率  $q$  の相関 (各駅間での検証)