

# 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

## Simulation model to analyze delay in commuter train schedule

情報工学専攻 中村 幸史

NAKAMURA Yukihiro

### 1 はじめに

東京首都圏における鉄道は、通勤、通学の足という重要な役割を担っており、ラッシュ時間帯には利用者が殺到し激しく混雑している。とくに、混雑が激しい路線においては、慢性的に遅延が発生している。通常、乗客数が増えると乗降にかかる時間が長くなって遅れが発生し、それとともなって先々の駅で電車を待つ利用者が増加するため、遅延が拡大するという性質がある[1]。

本稿では、電車の運行スケジュールをネットワークで表現し、遅延をネットワーク構造の変化として扱うことによって、電車の遅延を解析するシミュレーションモデルを構築する。このモデルを東急田園都市線に適用して、遅延が鉄道輸送に及ぼす影響を分析し、通勤電車運行スケジュールを評価する。また、普通（各駅停車）と急行の役割に注目して全ての電車を各駅停車にする運行スケジュールを提案し、その効果を検証する。

## 2 ネットワークモデル

### 2.1 利用データ

#### 2.1.1 電車時刻表

首都圏の路線の出発時刻が詳細に記載されている時刻表[2]から各駅における各電車の出発時刻を抽出し、各ノードの時刻座標として利用する。

#### 2.1.2 国土地理院 数値地図 2500（空間データ基盤）

数値化された地図データ[3]から各駅の座標を抽出し、各ノードの空間座標として利用する。

#### 2.1.3 電車定員

各路線で使用されている電車の編成と車両の定員から電車定員を算出し、各電車リンクの容量（電車に乗車できる上限の人数）を電車定員の3倍として定義する。

### 2.2 鉄道ネットワーク

鉄道ネットワークとして、128路線1815駅で構成される東京首都圏鉄道網を考える。図1に、対象とした路線

図を示す。



図1 東京首都圏鉄道網

### 2.3 時間-空間ネットワーク

時間依存のネットワークフロー問題を考えるために、通常の鉄道ネットワークを図2に示すような時間-空間ネットワークに拡張する[4]。このネットワークを用いると、時間変化する流れを静的なネットワーク構造の上の流れとして表すことができる。

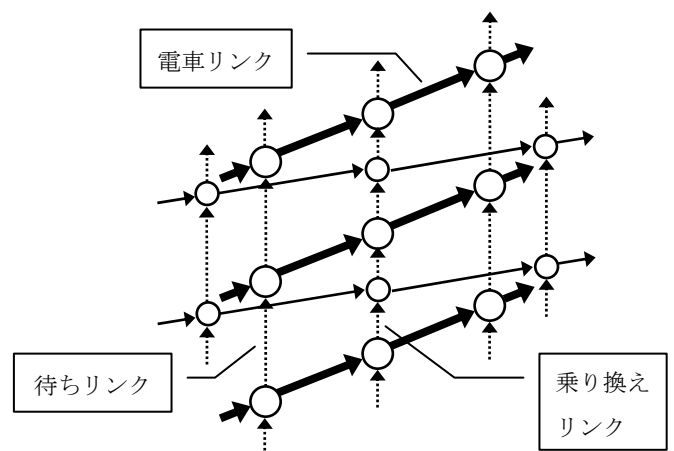


図2 時間-空間ネットワーク

図2において、ノードは各電車の各駅における停車を表し、実線のリンクは駅間の電車の運行、破線のリンクはホーム上での次の電車の待ち合わせ、あるいは他の路線への乗り換えを表す。電車リンクの属性は、移動時間、定員、種別であり、ノードの属性は、時刻、対応する路線駅コードである。

今回構築したネットワークは、大体6時前後に出発した電車から、11時前に終点駅に到着する電車を対象としており、総ノード数が150,270、総リンク数が474,213である。

### 3 交通量配分

#### 3.1 通勤利用者移動データ

##### 3.1.1 大都市交通センサスデータ

大都市交通センサスは、5年毎に行われている公共交通機関（バス、鉄道）の利用実態調査[5]である。本稿では、2000年の鉄道定期券利用者調査を使用した。このデータには、鉄道利用者の移動に関する実際の経路や時間等が詳細に記載されている。移動の始発駅と到着駅を時間変化する出発地到着地（OD）交通需要として利用する。2000年の調査には284,472件、8,548,238人分のデータがあり、その中で東急田園都市線及び地下鉄半蔵門線利用者に関しては20,813件、411,774人分のデータがある。

#### 3.2 利用電車割り当てアルゴリズム

センサスデータから得たOD交通需要を、時間-空間ネットワークに割り当てる。各利用者について、出発駅から到着駅への最短経路を求め、その経路に交通需要を付加する。ただし、各利用者毎に利用電車種別および利用路線、出発時刻をセンサスデータ通りとした上で最短経路を求める。

## 4 遅延計算モデル

### 4.1 概要

電車の乗降人数と混雑度から停車時間を算出し、停車時間が予め見積もられた調整時間を超えたときに遅延が発生するものとし、駅間所要時間や、電車運転間隔の制約を考慮して遅延を計算する。その値に基づいてネットワーク構造を変化させて、遅延を含む運行スケジュールを作成する。

### 4.2 停車時間の算出

駅のホームにおいて、電車が到着してから利用者の乗降が完全に終了するまでの時間を、停車時間と呼ぶ。慢性化している遅延の原因は、駅での停車時間によるところが大きい。通常、車掌の目視によって扉を閉めるため、最も乗降の多い特定の扉によって停車時間が決定されていることが推測できる。

乗降人数と停車時間の関係を把握するために、下記の内容で現地調査を行った。調査結果を図3に点で示す。

日時：2003年7月22日（火）

場所：東急田園都市線溝の口駅、二子玉川駅

対象：7時20分～8時41分発の上り電車37本（溝）

7時27分～8時50分発の上り電車38本（二）

項目：乗車人数、降車人数、一時降車人数、乗降所要時間、停車時間、混雑度

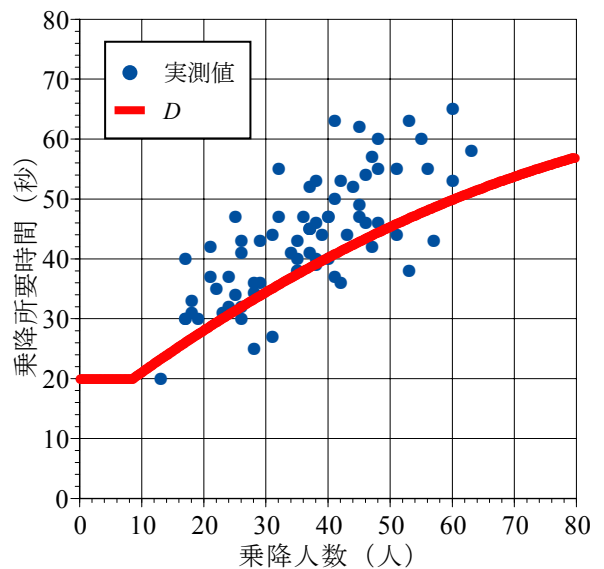


図3 乗降人数と乗降所要時間

また、大戸らによって、試験用車両を用いた乗降速度に関する実験[6]が行われている。この実験によって得られた結果に車内の混雑による影響を加味して、駅における停車時間を導出する関数を

$$D = -0.0031x^2 + 0.7908x + 0.003y \text{ (秒)} \quad (1)$$

と定義する。ここで、 $x$  は最も混雑している扉における乗降人数であり、 $y$  は車内の乗客数である。停車時間関数によって得られる値を、図3に線で示す。

### 4.3 調整時間の算出

鉄道では、多少の遅延が発生してもスケジュール通りに運行できるように、予め調整時間を設けている。この調整時間を推定するために、鉄道会社が発表している所要時分表[7]から駅間の標準所要時間を抽出する。時刻表から得られる各駅間の出発時刻の差を駅間の所要時間とし、そこから標準所要時間を減じた時間を到着駅における調整時間と仮定する。

### 4.4 遅延計算アルゴリズム

混雑によって引き起こされた遅延は、後続電車の運行に影響を与え、また、先々の駅で待っている人数が溜まるために、時間とともに拡大していく。一方、遅延が短ければ駅における調整時間によって吸収され、計画通りの運行に近づく。以下の手順で、遅れを含む電車の運行を再現する。

- Step1.** 利用電車割り当てアルゴリズムを用いて、各利用者を時間-空間ネットワークに割り当てる。
- Step2.** 各駅における各電車に対して、車内人数  $y$  と乗降人数  $x$  をそれぞれ数える。本研究では、最も混雑している扉の利用者を全体の 5% と仮定する。
- Step3.** 停車時間関数 (1) 式に  $x, y$  を代入することによって、停車時間  $D$  を算出する。
- Step4.** 遅延時間  $D' = \max(D - 20, 0)$  を算出する。駅において電車が最低限停車していなければならない時間を 20 秒と仮定するため、停車時間が 20 秒を超えたとき、つまり、 $D' > 0$  のときに遅延が発生したことになる。
- Step5.** 各駅における各電車に対して、電車の経路に沿って停車時間  $D'$  を蓄積し、出発時刻に付加していく。
- Step6.** 各駅において、連続して到着する電車の間隔が 120 秒未満だった場合、後から到着した電車の出発時刻を遅らせ、間隔を 120 秒にする。
- Step7.** 各電車において、連続した駅間の所要時間が同駅間の標準所要時間より短くなった場合、駅間を標準所要時間で移動するように、次駅の到着時刻を遅らせる。ただし、既存のスケジュールにおいて標準所要時間未満で運行されている

駅間については、その所要時間を標準所要時間とする。

- Step8.** Step 6 あるいは Step 7 において、各駅における各電車の出発時刻のいずれかが変更された場合、Step 6 に戻る。
- Step9.** Step 6 あるいは Step 7 において、スケジュールの変更が一度も発生しなかった場合、この操作を終了する。そうでなければ、Step 1 へ戻る。

遅延は調整時間によって吸収されるため、Step 5, 6, 7 において、各駅における遅延時間が調整時間よりも短い場合、調整時間から遅延時間を減じ、遅延時間を 0 秒とする。

## 5 東急田園都市線への適用

### 5.1 東急田園都市線概要

東急田園都市線は、都心部における主要な乗り換え駅である渋谷駅と、東急多摩田園都市と呼ばれる郊外の大規模住宅地とを結んでいる、典型的な通勤型路線である。運行形態は、普通（各駅停車）と急行の 2 種類であり、駅における電車の接続はない。

### 5.2 シミュレーション結果

電車が時刻表通りに運行した場合と、構築したモデルを適用して遅延が生ずる可能性を考慮した場合の、乗車人数、所要時間等を比較した。

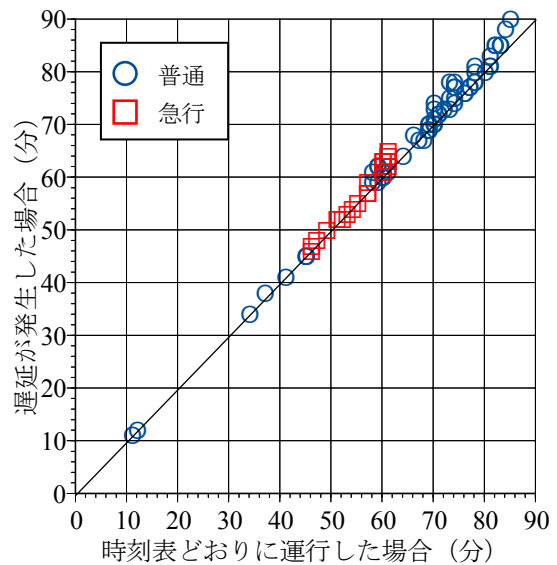


図 4 各電車の所要時間

各電車の始発駅から終着駅までの所要時間の変化を図4に示す。全電車に関して、遅延を考慮した場合に所要時間が長くなり、最大で5分遅くなっている。この路線において、日常的に数分の遅延が発生していることから、このモデルは的外れではないと言える。

### 5.2 運行スケジュール代替案

既存の運行スケジュールでは、普通に比べて急行の利用者数が非常に多い。この偏りが遅延をひどくしていると考え、全電車を普通に変更してシミュレーションを行った。各電車の始発駅、始発時刻は既存のスケジュールに従い、駅間を標準所要時間で移動するものとする。

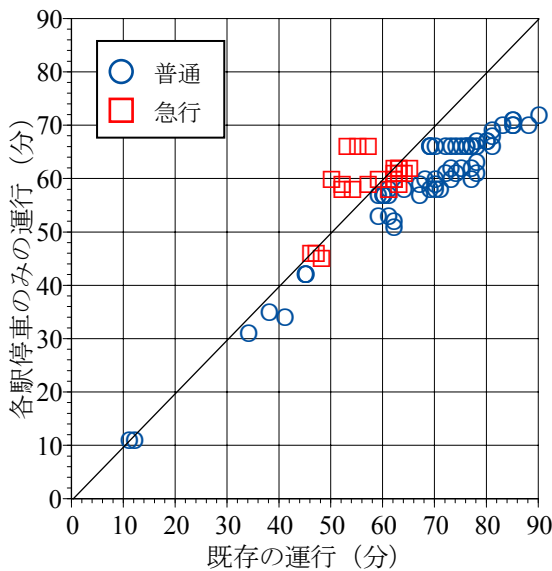


図5 各電車の所要時間変化

所要時間の変化を図5に示す。図5において、丸が既存のスケジュールにおいても普通である電車を表し、四角が急行から普通に変更された電車を表す。一部の電車を除き、既存のスケジュールよりも所要時間が短くなっている。

図6に東急田園都市線利用者の鉄道利用時間を示す。多くの利用者にとって、鉄道利用時間が短縮され、平均すると1人あたり2分程度短縮されるという結果を得た。

以上の結果より、各電車の利用人数の偏りが無くなると、輸送力が向上すると言える。

## 6 まとめ

鉄道に関する研究において、今まであまり考慮されることのなかった「遅延」を正面から取り上げ、遅延を解析する詳細なシミュレーションモデルを構築し、遅延が及ぼす影響を定量的に把握することができた。

### 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導、ご助言を頂いた中央大学理工学部 田口 東教授に深く感謝いたします。また、研究を通してお互い学び、励ましあった田口研究室の同輩諸氏に感謝いたします。

### 参考文献

- [1]高橋 幸雄, 森村 英典. 混雑と待ち. 東京, 朝倉書店, 2001.
- [2]「MATT」関東圏 JR 線私鉄線時刻表 2001 年 9 月号. 東京, 八峰出版株式会社, 2001.
- [3]数値地図 2500 (空間データ基盤). 東京, 財団法人日本地図センター, 1992.
- [4]田口 東. “首都圏電車ネットワーク上の時間変化する乗客分布の計算”. 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp. 30-31, 2003.
- [5]平成 12 年度大都市交通センサス. 東京, 財団法人運輸政策研究機構, 2002.
- [6]大戸 弘道ほか. “鉄道駅における旅客流動に関する研究 その 8 乗降速度に関する実験”. 日本建築学会大会学術講演梗概集, E-1, pp. 845-846, 1999.
- [7]東京急行電鉄. “田園都市線各駅所要時分”. (オンライン), 入手先 < [http://www.tokyu.co.jp/contents\\_index/railway/syoyou/dento\\_319.pdf](http://www.tokyu.co.jp/contents_index/railway/syoyou/dento_319.pdf) >, (参照 2003-9-29).

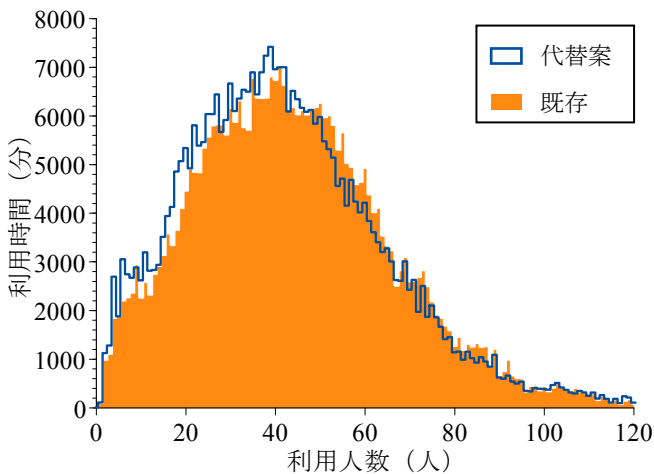


図6 東急田園都市線利用者の鉄道利用時間