

通勤電車の遅延計算モデル

鳥海 重喜, 中村 幸史, 田口 東

1. はじめに

東京を中心とする首都圏における鉄道は、毎朝、約800万人の通勤通学客に利用されており、乗客が集中するラッシュ時間帯では激しく混雑している。

通常、電車が混雑すればするほど、人の乗降にかかる時間は長くなり、遅延が発生する。遅延が生ずると、後続電車が影響を受けること、また、先々の駅で待っている人が溜まることで、さらに乗降時間が長くなり、遅延が拡大していく[3, 8]。鉄道会社では、混雑による乗降時間の拡大を予測して、混雑時には標準的な所要時間よりも余裕を持ったスケジュールを組んでいる。例えば、東急田園都市線の普通電車における中央林間-渋谷間の平均所要時間は、早朝および深夜は49分であるのに対し、急行通過待ち合わせがあるため日中は55分、ラッシュ時間帯（渋谷駅到着時刻7:30~9:00）は60分となっている。東急電鉄が公表している同駅間の標準所要時間は49分であるので、日中では6分、ラッシュ時間帯では11分の余裕時間を持っている。したがって、遅延が短ければ、この余裕時間で吸収してラッシュ時間帯においても時刻表どおりに運行される。しかし、鉄道会社の想定を上回る遅延が発生した場合は、余裕時間で吸収しきれなくなり、時刻表からの遅延が発生する。

本稿では、電車の運行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

とりうみ しげき

中央大学 大学院理工学研究科

〒112-8551 文京区春日 1-13-27

なかむら ゆきひと

パイオニア(株)

〒153-8654 目黒区目黒 1-4-1

たぐち あずま

中央大学 理工学部

〒112-8551 文京区春日 1-13-27

受付 04.8.23 採択 05.3.18

が鉄道輸送に及ぼす影響を調べる。また、急行電車への乗客の集中に注目して、すべての電車を普通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. 首都圏電車ネットワーク

首都圏鉄道網は、路線がネットワーク状に発達しており、ラッシュ時間帯においては、電車の運行間隔は安全上の限界まで狭められ、過密スケジュールで運行されている[4]。また、鉄道利用者は、複数の路線を乗り換えたり、単一の路線内で普通と急行を乗り換える場合も多い。このように、鉄道利用者が時々刻々と移動する状態を表現するためには、空間的な広がりだけでなく、時間的な広がりも考慮しなければならない。

そこで、電車の発着時刻が確定的であることを使って、各電車の発着ごとにノードを作成し、それらの間を電車の駅間移動を表すリンクで結ぶことによって、乗客の動的な流れを静的なネットワークの流れとして表現する。この方法は、扱うネットワークがもとのネットワークに比べて大規模になってしまうが、時間軸方向の近似や乗客の集約をすることなく、乗客の移動を正確に表現することが可能であり、動的な定式化に比べて、扱いが容易である[6, 7]。乗客のデータは、

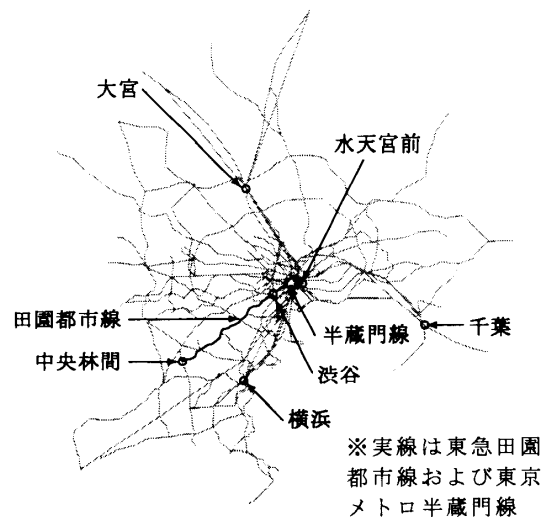


図1 首都圏鉄道路線図

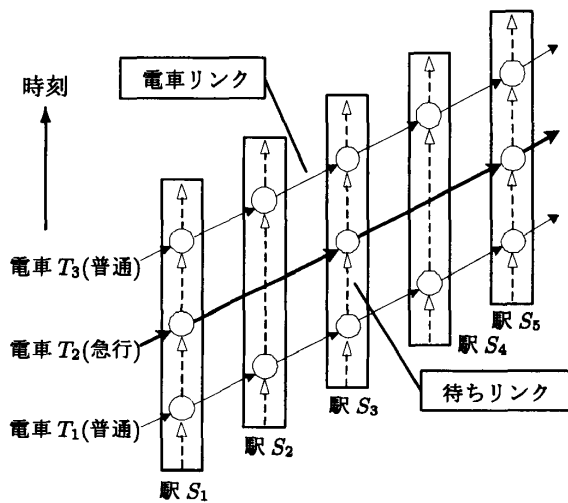


図2 電車ネットワーク

大都市交通センサス[10]の定期券利用者調査結果を用いる。対象地域を図1に示す。

2.1 電車ネットワークの作成

一般に、鉄道路線のネットワークは、駅をノードとし、駅間をリンクで結ぶことによって表現される。これを図2に示すように、各駅における各電車の発着をそれぞれノードで表し、駅間の電車の運行をリンク(電車リンク)で表すように拡張する。そして、同一駅にあるノードを時刻順に並べて、その間にリンク(待ちリンク)を張って、電車の待ちと乗り換えを表現する。このネットワークを、以降では電車ネットワークと呼ぶ。

電車定員は各社が公表している電車編成表[2]より代表的な値を求め、電車リンクの容量を、各路線の電車定員の3倍とした。

2.2 大都市交通センサス

大都市交通センサス[10]は、5年ごとに行われている公共交通機関(鉄道、バス)の利用実態調査である。ここでは、2000年の首都圏鉄道定期券利用者を対象として、平日の午前中に通勤通学のために利用した電車について、各乗客の出発駅から目的駅までの経路(利用路線、乗換駅、利用電車種別(普通、急行等))および乗車時刻(分単位)に関するデータを利用する。図1の地域全体で、定期券利用者は約800万人であり、サンプルとして約30万件のデータが存在している。

2.3 交通量配分

大都市交通センサスから、各利用者が出発駅、出発時刻、目的駅、途中乗換駅、利用電車種別を用い、電車ネットワーク上で出発駅から目的駅までの時間最短経路を求め、その経路に含まれるリンクに対して乗客を割り付ける。ただし、利用電車種別に基づいて経路

探索に含める電車リンクを決定する。具体的には、利用電車種別が普通の場合は、経路探索に含める電車リンクは普通電車のみとし、急行の場合は、急行電車もしくは普通電車を含めるものとする。また、得られた経路において、電車リンクの容量を超えていた場合は、その電車を利用できないものとし、それ以降の電車を利用する。

このようにして得られた乗客配分から、解析対象とする東急田園都市線および東京メトロ半蔵門線を通過する部分を切り出して、対象路線の時間依存OD交通需要として用いる。対象となる利用者は約40万人(約2万件のデータ)である。

3. 遅延計算モデル

混雑によって引き起こされる遅延を計算し、遅延時間に伴って電車ネットワーク構造を変化させることで、遅延を含んだ電車の運行を表現するモデルを提案する。

3.1 停車時間関数

電車の運行時間は、駅間の走行時間と駅における停車時間に分解できる。停車時間は、乗客の乗降に要する時間に依存し、最も混雑している扉での乗降人数によって決定されると考えられる[5]。この停車時間 \bar{D} と乗降人数 x との関係について、都築ら[9]は次の式を提案している。

$$\bar{D} = 21.9 \log x - 37.1 (\text{秒}) \quad (1)$$

しかし、式(1)には次の二つの問題が考えられる。

- ・ 停車時間が負になることがある。
- ・ 乗降客が少ない場合においても、扉の開閉等のためある程度の停車時間が必要である。

そこで、本モデルでは、乗降客がない場合においても最低15秒停車するものとし、停車時間関数 D を次式のように定める。

$$D = \max(21.9 \log x - 37.1, 15) (\text{秒}) \quad (2)$$

ただし、最も混雑している扉での乗降人数を定めることは困難であるため、解析対象とする東急田園都市線においては、車両編成が4扉車10両編成であるので、各扉で平均的に乗降した場合の2倍である(その駅での乗降者数の)5%を x として定めた。この数値は、青木ら[1]で調査された同様の電車の乗降分布の最大値とほぼ一致する。

停車時間関数が、どの程度現実を表しているのかを確認するために、現地調査を行った。調査の概要を次に示す。

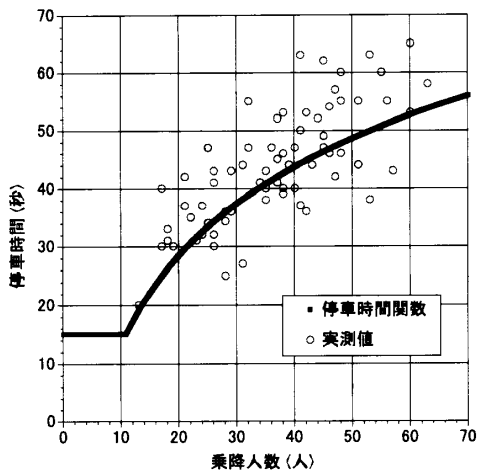


図3 乗降人数と乗降所要時間（停車時間）

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
(溝の口駅)，

7時27分～8時50分発の上り電車38本
(二子玉川駅)。

項目：(最も混雑している扉での)乗車人数，
(同)降車人数，(同)乗降所要時間，停車
時間，混雑度。

ここで，最も混雑している扉は，各駅のホームにおいて階段に最も近い扉とした。

図3に，乗降人数と停車時間との関係について，現地調査から得られた結果と，停車時間関数 D とを示す。

図3より，東急田園都市線において停車時間関数 D は妥当であると考えられるので，各駅での電車の停車時間を式(2)で算出する。

3.2 調整時間の算出

鉄道会社では，混雑時の乗降時間を予測して，標準所要時間よりも余裕を設けて時刻表を設定している。この余裕時間を，ここでは調整時間と呼ぶこととする。この調整時間を算出するために，鉄道会社が発表している所要時分表(表1)から駅間の標準所要時間を算出する。次に，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差し引いた時間を到着駅における調整時間と仮定する。

3.3 遅延アルゴリズム

節2.1で述べた，時刻表どおりの電車ネットワークが与えられたときに，各駅における各電車に対して，乗降人数をもとに遅延時間を算出し，時刻方向に遅延時間分だけ発着ノードをずらすことで遅延を表現する。

表1 東急田園都市線の標準所要時間（渋谷駅基準点）

駅名	普通	急行	駅名	普通	急行
渋谷	0	0	たまプラーザ	26	19
池尻大橋	2	-	あざみ野	28	20
三軒茶屋	4	4	江田	30	-
駒澤大学	6	-	市が尾	32	-
桜新町	9	-	藤が丘	34	-
用賀	11	-	青葉台	35	25
二子玉川	14	10	田奈	37	-
二子新地	15	-	長津田	39	28
高津	16	-	つくし野	41	-
溝の口	18	13	すずかけ台	43	-
梶が谷	19	-	南町田	45	-
宮崎台	21	-	つきみ野	46	-
宮前平	23	-	中央林間	49	34
鷺沼	25	17			

このとき，後続駅への到着が遅れること，電車の安全運行のために電車の最低運行間隔（ここでは120秒と設定）を維持することに注意する。

遅延計算アルゴリズムを次に示す。

Step 1 節2.3の交通量配分手順に従って，対象鉄道の利用者を電車ネットワークに割り当てる。

Step 2 各駅における各電車に対して，その駅において最も混雑している扉での乗降人数 x を算出し，停車時間関数(2)から停車時間 D を算出する。

Step 3 標準停車時間を20秒とし，停車時間 D から遅延時間 $D' = \max(D - 20, 0)$ を算出する。

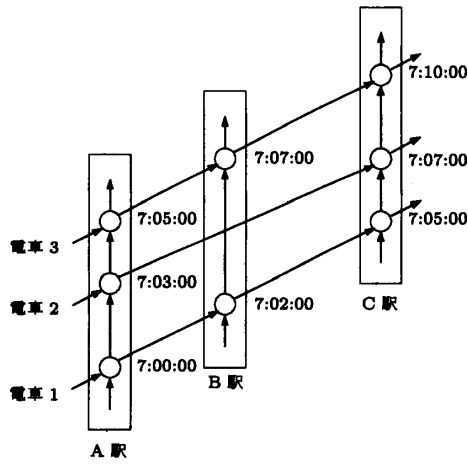
Step 4 各電車に対して，電車の経路に沿って各駅における遅延時間 D' を蓄積し，出発時刻に付加していく。ただし，遅延は調整時間によって吸収されるため，遅延時間が調整時間よりも短い場合は，調整時間を遅延時間分減らし，遅延時間を0秒とする。このステップにおいて，すべての発着ノードの時刻が変更されなければ，このアルゴリズムを終了する。

Step 5 各駅における各電車に対して，先行電車との時間間隔を算出する。電車どうしの間隔は自動車のようにならざることをできないので，接近最低時間間隔を120秒とし，先行電車との時間間隔が120秒未満であった場合，後続電車の出発時刻を遅らせ，間隔を120秒とする。

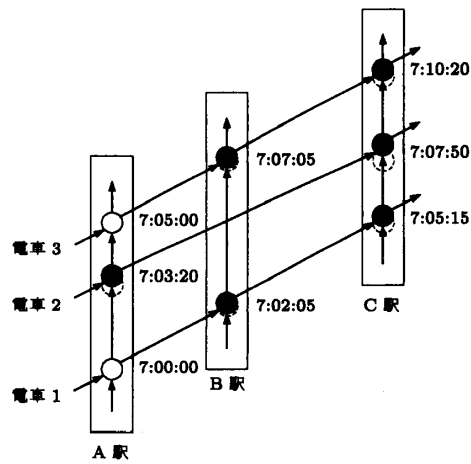
Step 6 各電車において，連続した駅間の所要時間が同駅間の標準所要時間よりも短い場合，駅間を標準所要時間で移動するように，次駅の到着時刻を遅らせる。

Step 7 Step 5あるいはStep 6において，各駅における各電車の出発時刻が1ヶ所でも変更された場合，Step 5へ戻る。そうでない場合はStep 1へ戻る。

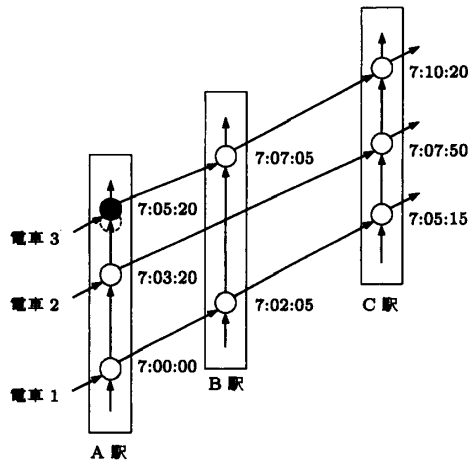
このアルゴリズムでは，スケジュールが変更される



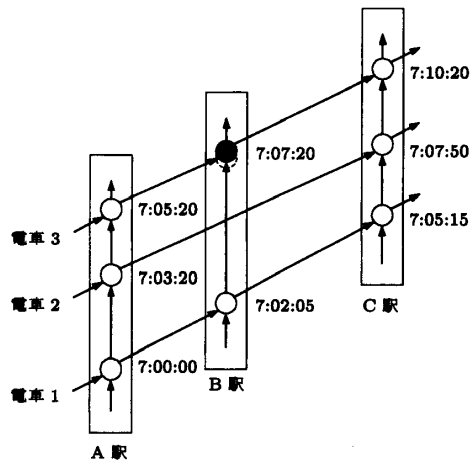
(a) 既存ネットワーク



(b) 遅延時間の蓄積 (Step 4)



(c) 運行間隔のチェック (Step 5)



(d) 標準所要時間のチェック (Step 6)

図4 遅延アルゴリズム (●はスケジュールに変更があったノード)

と、各電車の乗客数が変わるので、新しいスケジュールを用いてネットワークを再構築し、再度交通量配分を行う。

例を用いて遅延計算アルゴリズムを説明する。

図4(a)に示す乗換ネットワークが与えられたとする。ここで、普通の標準所要時間をAB間2分、CD間3分とし、急行の標準所要時間をAC間4分とする(簡単のために、調整時間が全く存在しないとする)。

まず、各駅における各電車に対して、Step 1からStep 3を実行し、それぞれの遅延時間 D' を算出する。今、乗換ネットワーク(a)では調整時間がないので、Step 4において D' がそのまま蓄積される(図4(b))。次に、Step 5では、A駅において電車2と電車3との運行間隔が120秒未満であるので、電車3の発車時刻を20秒遅らせ、電車の運行間隔を120秒とする(図4(c))。Step 6では、電車3における駅間ABの所要時間が標準所要時間である2分よりも短いので、B駅への到着時刻を15秒遅らせ、所要時間を2分と

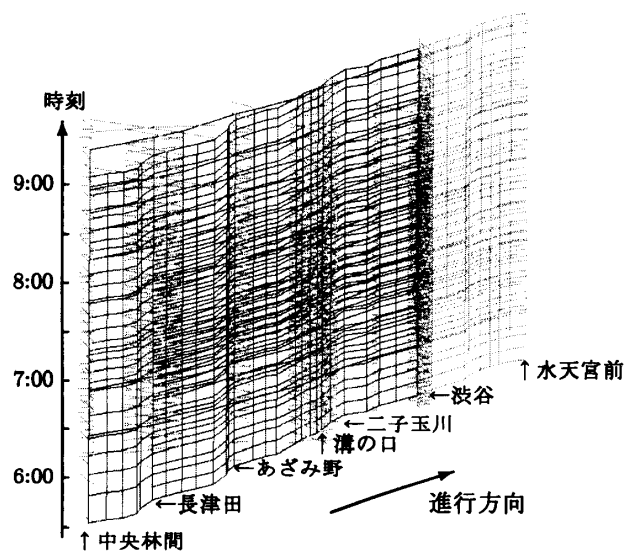
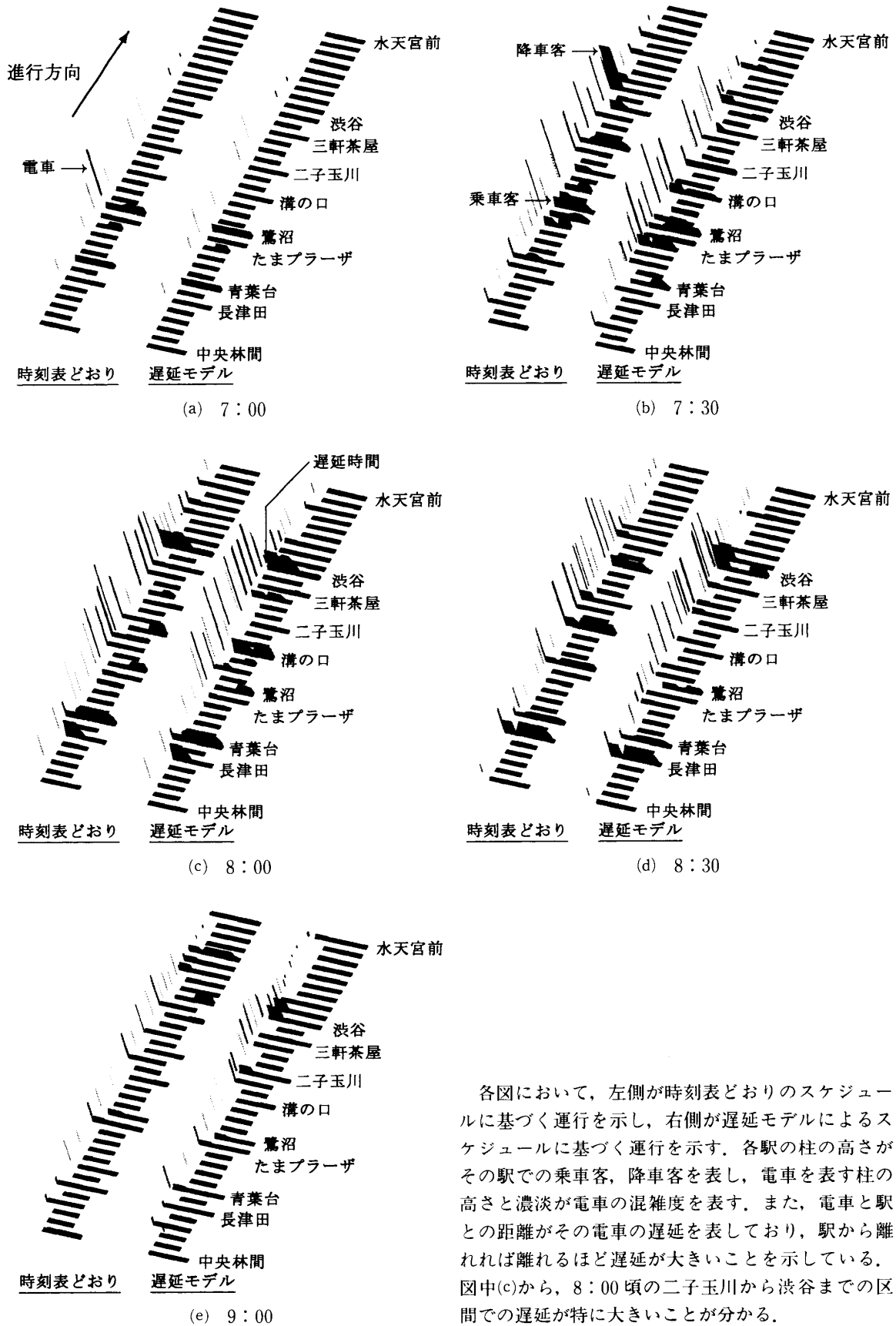


図5 東急田園都市線電車ネットワーク

する(図4(d))。

以降、スケジュールが変更されなくなるまでStep 1からStep 7を繰り返す。



各図において、左側が時刻表どおりのスケジュールに基づく運行を示し、右側が遅延モデルによるスケジュールに基づく運行を示す。各駅の柱の高さがその駅での乗車客、降車客を表し、電車を表す柱の高さと濃淡が電車の混雑度を表す。また、電車と駅との距離がその電車の遅延を表しており、駅から離れれば離れるほど遅延が大きいことを示している。図中(c)から、8:00頃の二子玉川から渋谷までの区間での遅延が特に大きいことが分かる。

図6 シミュレーション結果

4. 東急田園都市線への適用

東急田園都市線は、神奈川県の外と東京都心部とを結び、さらに終点の渋谷駅から東京メトロ半蔵門線に乗り入れている典型的な通勤型路線であり、1日平均100万人以上の利用者がいる路線である。渋谷駅をはじめとして、他路線との乗換可能駅が多数存在している。

また運行形態は、普通（各駅停車）と急行の2種類であり、通勤時間帯では同じ駅での普通と急行の接続はない。大都市交通センサスの利用電車種別データによれば、午前8時から9時までに渋谷駅に到着する電車の乗客数の普通、急行の比率は1:2であり、電車の本数はほぼ同数であることを考えると、急行に著しく乗客が偏っている。

対象とした電車は、平日の朝5:00以降に始発駅を発車し、同11:00までに終着駅に到着する86本の電車である。作成した電車ネットワークを図5に示す。

4.1 シミュレーション結果

東急田園都市線に遅延計算モデルを適用し、時刻表どおりに運行した場合と比較する。いくつかの時刻における路線上の電車の状態（混雑度、遅延時間）を図6に示す。

このシミュレーション結果から、遅延が及ぼす影響を定量的に評価する。

各電車の始発駅から終着駅までの所要時間を、その電車の運行時間と定義し、電車が時刻表どおりに運行した場合と、構築した遅延計算モデルを適用して遅延

表2 東急田園都市線の時間帯別平均運行時間と平均総調整時間（単位：分）

時間帯	平均運行時間		平均総調整時間	
	普通	急行	普通	急行
5~6時台	51.7	-	0.5	-
7時台	63.7	55.6	5.5	7.6
8時台	73.3	56.6	13.4	11.6
9~10時台	74.1	55.4	9.2	4.9

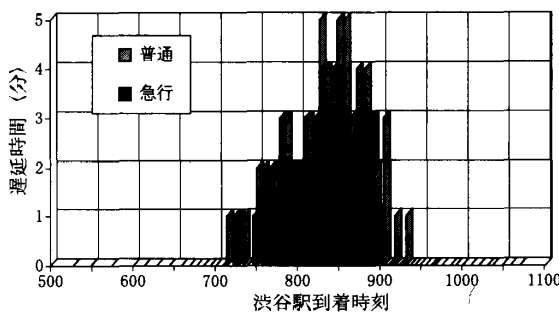


図7 遅延時間

が生ずる可能性を考慮した場合での運行時間を比較する。

まず、電車が時刻表どおりに運行した場合における時間帯別の平均運行時間と平均総調整時間を表2に示す。ここで平均総調整時間とは、電車ごとに各駅間の調整時間を合計し、その時間帯の電車に平均をとったものである。ラッシュ時間帯には調整時間が多くとられていることが分かる。

次に、遅延時間を図7に示す（時刻は、電車が時刻表どおりに運行した際の渋谷駅への到着時刻である）。図7より、7時過ぎから遅延が発生し始め、8時台に渋谷駅に到着する電車に遅延が多く発生していることが分かる。8時台の電車は、最も利用者が多いため、調整時間も多く設定されている。それにもかかわらず、遅延が発生しているということは、あらかじめ設定されている調整時間では、混雑によって発生する遅延を吸収しきれなくなっていることを意味している。遅延モデルから算出した最大遅延時間は5分であり、この路線において、日常的にラッシュ時間帯の時刻表と比較して5分程度の遅延が発生しているという著者の経験に基づくと、本モデルが現実の遅延をよく表していると考えられる。

次に、各利用者の東急田園都市線の乗車時間（以降、鉄道利用時間と呼ぶ）を分析する。図8に鉄道利用時間1分ごとにまとめた人数を示す。時刻表どおりに運行した場合の鉄道利用時間の平均は43.7分、遅延モデルによる鉄道利用時間の平均は44.6分である。したがって、鉄道利用時間が約1分長くなっていることが分かる。

4.2 運行スケジュール代替案

東急田園都市線のように、普通と急行が混在している路線では、普通に比べ急行の利用者が多いことが、

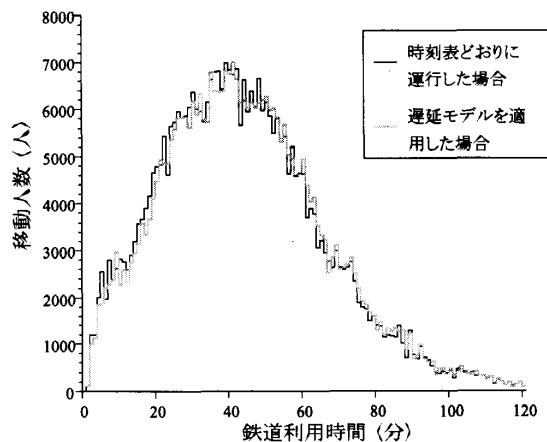


図8 田園都市線利用者の鉄道利用時間

経験的に知られている。この場合には、普通と急行との乗車人数の偏りが遅延をより大きくする原因となる。

本節では、すべての電車を普通にした場合の運行スケジュールを提案し、利用者に与える影響を分析する。以下の手順で普通のみでの運行スケジュールを作成した。

Step 1 既存の時刻表から、(普通, 急行を問わず) 各電車の始発駅と始発駅を出発する時刻を抽出する。

Step 2 各電車は始発駅を出発してから、駅間を標準所要時間で移動するものとして各駅の出発時刻を設定する。

Step 3 各電車の始発駅において、出発時刻が同じ電車が存在している場合、一方の電車の出発時刻を1分遅らせ、次駅以降の出発時刻も同様に1分遅らせる。

そして、作成した普通のみでの運行スケジュールに、遅延計算モデルを適用して、遅延を考慮した運行スケジュールを算出する。

東急田園都市線利用者の鉄道利用時間の変化を図9に示す。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人当たり2分程度短縮されるという結果を得た。

次に、各電車の始発駅から終着駅までの所要時間である運行時間の変化を図10に示す(時間帯は、電車が時刻表どおりに運行した際の渋谷駅への到着時刻である。また、凡例の「元の時刻表の急行」は、既存のスケジュールにおいて急行電車であったことを示す)。早朝の時間帯では運行時間に大きな変化は見られないが、ラッシュ時間帯となる7時台や8時台では、既存のスケジュールにおいて急行であった電車の一部を除

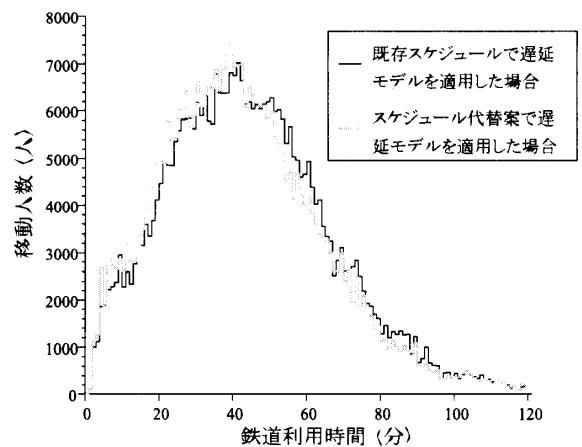


図9 田園都市線利用者の鉄道利用時間

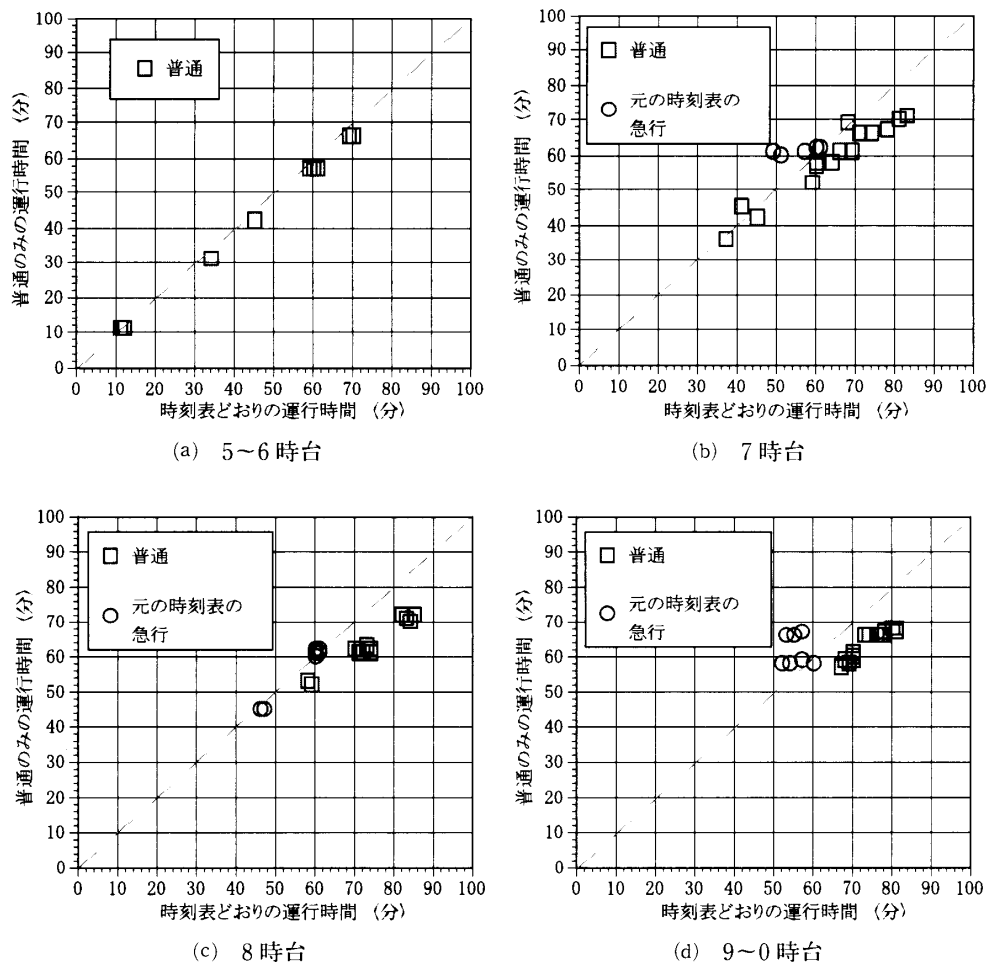


図10 各電車の運行時間の比較

き、ほとんどの電車の運行時間が短くなっており、普通のみに変更することの効果は大きいと考えられる。

5. おわりに

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した。本モデルを東急田園都市線に適用した結果、算出された遅延時間は実際の遅延時間と近い値であり、本モデルの妥当性を示すことができた。

遅延が発生する原因は、一部の電車に利用客が集中することで乗降時間が長くなるためであり、過密スケジュールで運行している路線においては、この遅延が後続電車にも影響を与え、時間とともに遅延が拡大していく様子が確認できた。

そして、東急田園都市線において、すべての急行を普通に変更した運行スケジュールに対して本モデルを適用することで、急行への利用客の偏りが遅延の原因であることを示し、ラッシュ時間帯では、提案したスケジュールは既存のスケジュールと比べて輸送力が向上するという結果が得られた。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費「都市の交通および施設配置に関する総合的研究」の一環として行われたものである。また、中央大学特定課題研究費(2003年度)の補助も受けている。

参考文献

[1] 青木俊幸, 大戸広道, 河合邦治, 古賀和博, 都築知人, 不

破 徹, 「鉄道駅における旅客流動に関する研究 その10 降車分布」, 『日本建築学会大会学術講演梗概集』, E-1 (1999), 849-850.

[2] 楠居利彦, 今田 保, 坂 正博, 『私鉄車両編成表 02 年版』, ジェー・アール・アール, 2002.

[3] 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』, 142-143, 2004.

[4] 仁科雅夫, 大内正幸, 『MATT 関東圏 JR 線私鉄線時刻表』, 八峰出版, 2001.

[5] 大戸広道, 青木俊幸, 河合邦治, 都築知人, 「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 (1999), 845-846.

[6] 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 2003 年秋季研究発表会アブストラクト集』, 30-31, 2003.

[7] 田口 東, 中村幸史, 「首都圏電車ネットワークの利用者均衡交通配分問題」, 『日本オペレーションズ・リサーチ学会 2003 年秋季研究発表会アブストラクト集』, 32-33, 2003.

[8] 高橋幸雄, 森村英典, 『混雑と待ち』, 2001.

[9] 都築知人, 青木俊幸, 島田章義, 小田雄生, 村井孝至, 「鉄道駅における旅客流動に関する研究 その7 JR 西日本京都線における旅客乗降と列車停車時分に関する研究」, 『日本建築学会大会学術講演梗概集』, E-1 (1998), 847-848.

[10] 運輸政策研究機構, 『平成 12 年度大都市交通センサス』, 2002.