

# 鉄道の通勤利用モデルとソフトな混雑緩和策

田口 東

東急田園都市線では2007年春より、朝の急行を各駅停車に格下げした。混雑による遅れを緩和する目的である。田園都市線の混雑のハードさは“鉄”にはよく知られており、某メーカーが、電車内でPC液晶が破損した原因を調べたところ、想定をはるかに上回る圧力が測定され、設計を変更したという話もある。社会環境を考えると、線路の増設などのハードウェアではなく、電車の利用方法というソフトな解決策を考えるのは合理的であろう。そのためには、電車の運行を詳細に既述できるモデルが重要である。本文では、時空間ネットワークと応用例を紹介し、乗り換え案内だけではなく、計画の分野への応用の可能性を述べる。

キーワード：鉄道網、通勤移動、時刻表、混雑、遅れ、時空間ネットワーク、大都市交通センサス

## 1. 急行を格下げ

東急田園都市線では2007年春より、朝の通勤時間帯の急行を二子玉川駅から渋谷駅の間、各駅停車（準急）に格下げした。これは、沿線の開発にともなって、この路線の混雑がひどくなる一方であり、混雑による電車の遅れを緩和することが目的とされている。筆者はこの路線を10年以上通勤に利用している。混雑は最近に限ったことではなく、特に、普通電車と比較して急行電車が極めて混雑しており、二子玉川駅を過ぎてトンネルの中に入り、渋谷駅に近づくと混雑が著しくなる傾向がある。遅れはほぼ毎朝生じており、「前に電車がつかえているので遅れている」というアナウンスがなされ、通常で5分、雨天や、乗客が気分が悪くなるなどのアクシデントがあると、それ以上遅れてしまう。

電鉄各社は、客を早く目的地に到着させることを良いサービスのひとつと考え、過密なダイヤの中を工夫して、急行電車を走らせている。利用者も、多少混雑していても、早く到着することを好む人が多く急行に集中する。ところが、乗客が多くなると、ホームでの乗り降りに時間がかかってしまって電車が遅れてしまう。いったん遅れが生じると、次の駅では普段よりも多くの人々が待っているため、さらに乗り降りに時間がかかり、遅れが拡大するという悪循環が起きる[8]。

路線容量が一杯でこれ以上は増発できないとすると、

もし経済成長期ならば、複々線化などのハードウェアの増強が解決策の本流であろう。しかし、首都圏全体をみると、現在まで各方面の努力によって輸送容量が増強されて、通勤時の混雑が緩和されてきており（図1）、さらに少子化高齢化によって、通勤客数の増加は望めないという状況にある。また、ラッシュのピークは、週日朝8時の前後1時間程度の短時間であり（図2）、それ以外の時間に走行する電車はがらがらである。このように考えると、電車の利用方法というソフトな解決策を考えるのは合理的であろう。かりにハードを整備して輸送容量を上げたとしても、同様の問題を考える必要は残る。

急行は個人にとって“良いサービス”であるが、利用者が過度に集中してしまうと、大きな遅れが生じて急行の意味がなくなってしまう。それだけではなく、

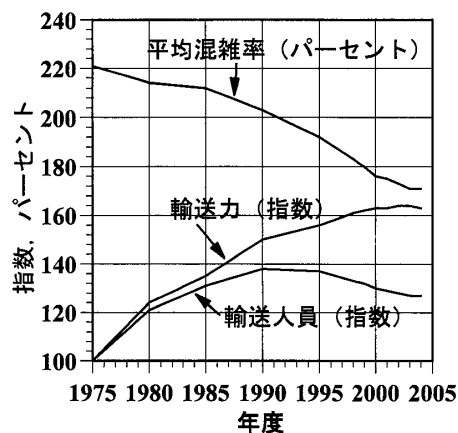


図1 東京首都圏通勤時の最混雑区間における平均混雑率、輸送力、輸送人員の推移（国土交通白書）  
輸送力、輸送人数は1975年を100とする値  
混雑率は輸送人員/輸送力×100

たぐち あずま  
中央大学 理工学部  
〒112-8551 文京区春日1-13-27

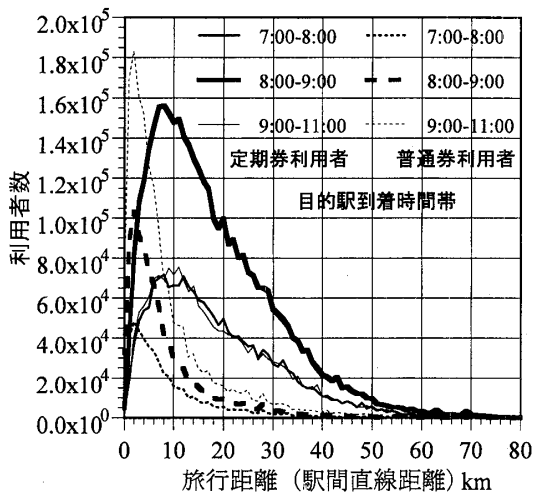


図2 目的駅到着時間帯別の鉄道利用者数

後続の電車を引き連れてシステム全体の効率を悪化させる。ソフトな解決策のキーは需要の平均化であろう。視野を少し広く取ると、時差出勤は時間軸上の乗客の偏りを平均化する提案である。残念ながら“良いサービス”を利用するつもりで個人に“悪いサービス”を強制する手段はない。そこで、選択の余地がないように、同一のサービスにしてしまおうというわけである。個人の選択の自由を制限することによって、システム全体としての効率の向上をねらったことになる。

### 1.1 メディアに登場

筆者が通勤客の電車経路選択の要因を調べていたときに、利用者は車内が混雑しても急行を選択する傾向が強いことが分かっていた。そして、筆者自身が通勤に利用する電車の日常的な遅れに対して、「時刻表はウソをついている」という疑問もあり、通勤客の電車利用モデル[6][7]の応用のひとつとして、田園都市線に実際に生じている遅れを表現できるモデルの作成を試みた。さらに、それを一歩進めて、すべての急行を普通に格下げしたダイヤを作成し、需要が偏らない場合に生じる遅れを計算して、混雑による遅れの緩和と、急行が遅くなることのどちらが勝つかをシミュレーションによって確かめた。この結果は、2005年にオペレーションズ・リサーチ誌に発表した[9]。

それから2年後、田園都市線において、最混雑区間にまったく同じ方式が取り入れられるという新聞報道がなされた。残念ながら、東急との共同研究ではなかったもので、web検索にかかりやすいように当該記事を参照しながら、大学のホームページに解説を掲載した。朝の通勤ラッシュは首都圏のサラリーマンにとって大きな問題であり、急行電車を格下げするといった

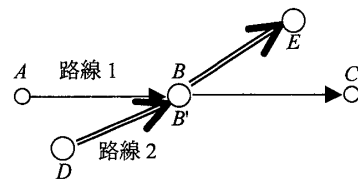


図3 電車路線の例

「逆転の発想」が注目を集める格好の話題となると考えられたためか、理論的な解説を求めて新聞記者が取材に訪れた。それをきっかけとして、ラジオ、テレビで解説を行うことになり、筆者がORを勉強して苦節30年、初めて研究成果が世間に取り上げられたわけである。

この話題の基礎には、時刻表通りに電車乗客の移動を表現できる時空間ネットワーク、個々の通勤客の移動データを集めた大都市交通センサスが使われている。

## 2. 電車で移動するモデル

### 2.1 時空間ネットワーク

時刻表通りの電車の運行をグラフで表し、電車による移動、電車の乗り換え、徒歩による駅間の移動を表現できるネットワーク(時空間ネットワークと呼ぶ)を作成する。まず、駅は路線ごとに異なる駅と考える。そして、乗り換えがある駅対として、同じ構内にあって乗り換えにコストのかからない駅対、改札口を通ったり徒歩で移動したりといったコストがかかる駅対を選び出す。前者と後者の差は、入手できる地理データと分析の精度に依存する。

図3の例では、実線の路線1(駅A, B, C)と二重線の路線2(駅D, B', E)があり、BとB'が同一駅、CとEが徒歩による乗換駅である。図4は縦方向に時間の経過を対応させて電車の運行を表してある。各駅における電車の到着と出発とを分けて枝(停車リンク、図4のB駅)をはり、停車状態を表してある。駅における乗り換えの厳密さを無視すれば、着発を区別せずにひとつの頂点で表すことができる。これらの頂点对の間に、乗客の移動を表す3種類の枝を定義する。まず、駅間の電車移動を表すために電車の出発から到着へ枝(走行リンク)をはる。次に同一駅にある頂点を時間が経過する順序に並べて、その間を順に枝(待ちリンク)でつないで、電車の待ちと乗り換えを表す(図4垂直な点線)。最後に、徒歩により乗り換える駅対に対して、駅間の距離から所要時間を計算し、移動元の駅にある頂点から、移動先の頂点のうち所要

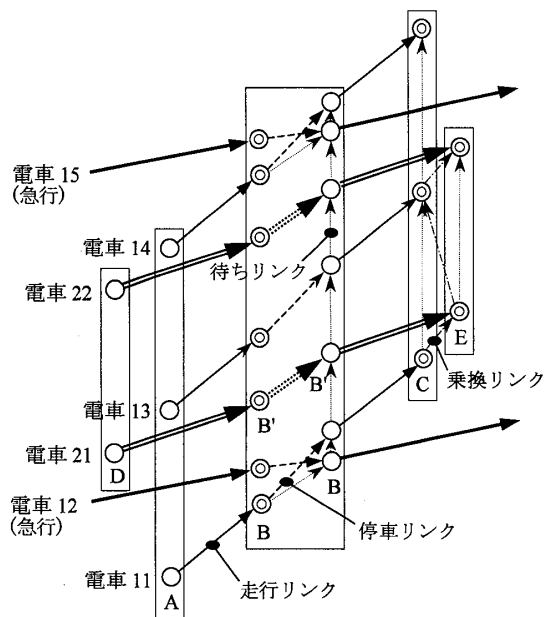


図4 時空間ネットワーク

時間を足して間に合う最早の頂点に枝（乗換リンク）をはって、乗り換えの移動を表す（図4一点鎖線）。

時空間ネットワークはデータ量が非常に大きくなる傾向があるが、構造が素朴で、非常に使いやすいモデルである。首都圏全体の通勤客の移動を表したいので、路線の面的な広がりや乗り換えを考える必要があり、ネットワークを扱うことは容易に理解されるであろう。乗り換えは非常に多く、新宿駅（JRすべての路線）を例にとると、最終目的駅とする客は約13万人であるのに対して、乗り換え客はその倍の約27万人いる（2000年大都市交通センサス）。よく使われるのは、地図の路線図をグラフと考え、電車の本数と種類に応じて路線の交通容量を定義し、乗客の移動をフローとするモデルである。駅間の距離（時間）や移動人数などを平均的な値として、静的な問題として定式化できる場合にはこれが適している。しかし、解きたい問題に時間依存性が現れることは多い。よく利用される乗り換え案内は、出かける時刻に応じて、最短時間で到着できるように乗るべき電車を選んでくれる。この問題は明らかに時間依存である。しかし、時刻表を持っていれば、各移動の所要時間は決まっているので静的な問題となる。道路を走る車とは異なり、電車のスケジュール表（時刻表）があり、日本ではかなり精確に守られているので、時間とともに移動する電車を静的なネットワークで表現することができるのである。

もうひとつ、電車利用の実態の検討を例にとろう。今度は交通需要も時間依存となる。路線の交通容量

（電車の本数）を時間の関数としても、急行を待つ乗り換え、目的駅に近くなって普通に乗り換えるといった動きを表現することは難しい。各乗客の移動が、出発駅と目的駅、途中乗り換え、利用電車の種別として与えられたときに、時空間ネットワークを用いると、対応する電車に割り当てることができる。書類を整理するときに、書類の特徴や内容と一対一に対応しているファイルホルダーをきちんと用意してあると考えると分かりやすいであろう。

## 2.2 大都市交通センサス

大都市交通センサスは5年ごとに行われている公共交通機関（鉄道、バス）の利用調査報告である[1]。次節の計算では、2000年10月23日～27日に行われた調査結果の中から、東京首都圏の電車の定期券利用者を対象として、上記の1日に通勤通学のために往きに利用した電車について、自宅の最寄り駅から目的地の最寄り駅までの出発時刻と到着時刻、乗り換え駅、利用電車の種別（普通、急行など）が乗客ごとに記述されたデータを利用する。首都圏全体で約800万人の定期券利用者があり、約30万人がサンプルとして選ばれている。このデータがあって初めて通勤客の電車利用モデルを考えることが可能となったといえる。

## 3. 電車の遅れを緩和する逆転の発想

電車の混雑による遅れは、鉄道会社も予測していて、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。田園都市線の普通電車が中央林間から渋谷駅に着くまでの平均的な所要時間は、早朝と深夜は49分であるのに対して、急行に抜かれる日中は55分、ラッシュ時間帯は60分となっている。東急電鉄が公表している標準所要時間は49分であるので、日中で6分、ラッシュ時間帯で11分の余裕を持たせている。この余裕で吸収できないような遅れが発生すると、時刻表から遅れてしまう（この項の内容は計算を行った2002年当時の時刻表[2]による）。

ここで考えるモデルの構成要素は次のとおりである。  
**ネットワーク**：電車の運行、乗客の乗り降りを時空間ネットワークによって表現し、電車の遅れをネットワークの頂点を持つ時刻の変化によって表す。

**利用者の移動**：大都市交通センサスにある首都圏全体の通勤客の移動を時空間ネットワーク上で表現し、田園都市線の部分を切り出すことによって、それぞれの利用者の移動データを得る。

**停車時間**：ドアの開閉にかかる時間（停車時間）は、

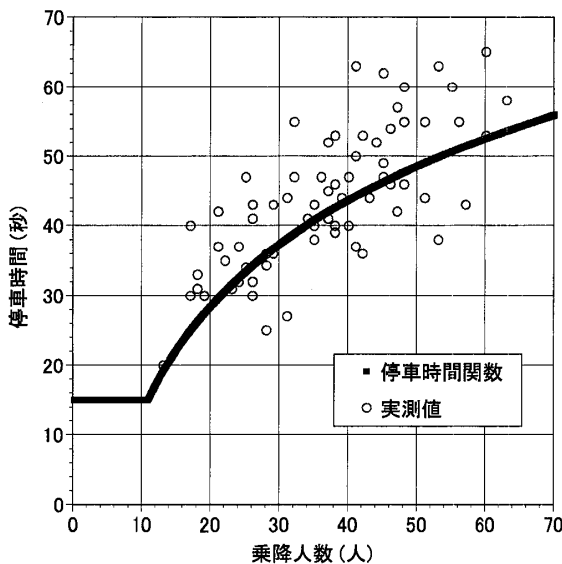


図5 停車時間関数

モックアップモデルを用いた実験の結果から得られている実験式を利用する[5]。筆者らも、この実験式を田園都市線のホームでの観察によって確かめた(図5)。この式を利用するためには、乗降人数から、もっとも人が多く通過するドアの人数の割合を見積もらなければならない。この割合を5%とした。また、乗降人数が少なくても、標準停車時間(20秒とする)だけは停車するものとする。

**運行ルール：**各電車、各駅間に対して、時刻表の運行時間と標準所要時間との差を余裕時間とする。安全のために先行列車との間隔(安全運行間隔)を保つものとし、その時間を時刻表にある電車間隔の最小値とする。ここで使った電車の運行に関するルールは、簡単な内容を仮定して作ったものであり、実際の規則ではないことに注意してほしい。

### 3.1 遅延計算アルゴリズム

次のような繰り返し計算によって、混雑による電車の遅れを計算する。

**Step 1** 時刻表通りのネットワーク上で、各駅、各電車における乗降人数を計算し、停車時間を算出する。標準停車時間を超えた分を停車延長として記録する。ただし、停車延長が余裕時間よりも短い場合は、余裕時間を停車延長分減らして、停車延長を0とする(図6(a))。

**Step 2** 各電車に対して、始発駅から順に各駅において停車延長を累積し、出発時刻に加えていく。すべての出発時刻がそのままであれば、アルゴリズムを終了する(図6(b))。

**Step 3** 各駅、各電車に対して、先行電車との間隔を計算し、安全運行間隔を下回っていれば、安全間隔を保つように出発を遅らせる(図6(c))。

**Step 4** 駅間の所要時間が標準所要時間よりも短くなってしまったら、次駅の到着時刻を遅らせる(図6(d))。

**Step 5** 上の2~4のいずれか所でも時刻の変更があれば、Step 1へもどって、客の乗降人数の計算からやり直す。

計算を行うと、渋谷駅に8時15分から30分に到着する電車の遅れが一番大きくて、5分程度遅れるという結果を得る。これは、アクシデントがなくても常時このくらい遅れることを意味しており、筆者の経験に合っている。

次に、乗客数の平均化によって遅れを緩和できるかどうかを検証する。まず、時刻表を参考にして、急行電車をすべて普通電車に格下げしたスケジュールを作成する。そして、乗客は、ホームにいるときに一番先に来た電車に乗るものとする。それに、遅延計算アルゴリズムを適用して遅れを計算し、実行可能なスケジュールとする。「急行あり」の時刻表と「普通だけ」の時刻表に対して、計算して得られた乗客の電車利用時間分布(中央林間から水天宮前を対象とする)の比較を図7に示す。図からわかるように、急行の格下げによる乗客数の平均化は効果があり、利用時間分布は短縮されている。平均利用時間も44.6分から42.5分へ約2分間短縮されている[9]。2007年春に実際の時刻表が改訂されてからは、準急が極端に混むようなことはなくなり、遅れも少なくなっている様子である。

上述のように遅れの計算に大がかりな道具立てを用意している。それは、元の時刻表も実行可能となるように十分検討して作られているはずなので、遅れを計算し、新たに提案するスケジュールの有効性を示すといった説得力のある結果を得るには、現実のデータを駆使する詳細なモデルを用いる必要があると考えるからである。

## 4. 怖い応用から地道な応用

首都直下地震がそれほど遠くない時点で起こると予想され、震源地、震度分布、様々な被害の想定がなされている。東京首都圏における社会活動の特徴の一つに、朝の通勤時間帯に非常に多くの通勤客が電車で都心に向かっていくことがある。これに関して、帰宅困難者対策が論じられることが多い。筆者は、もし朝の

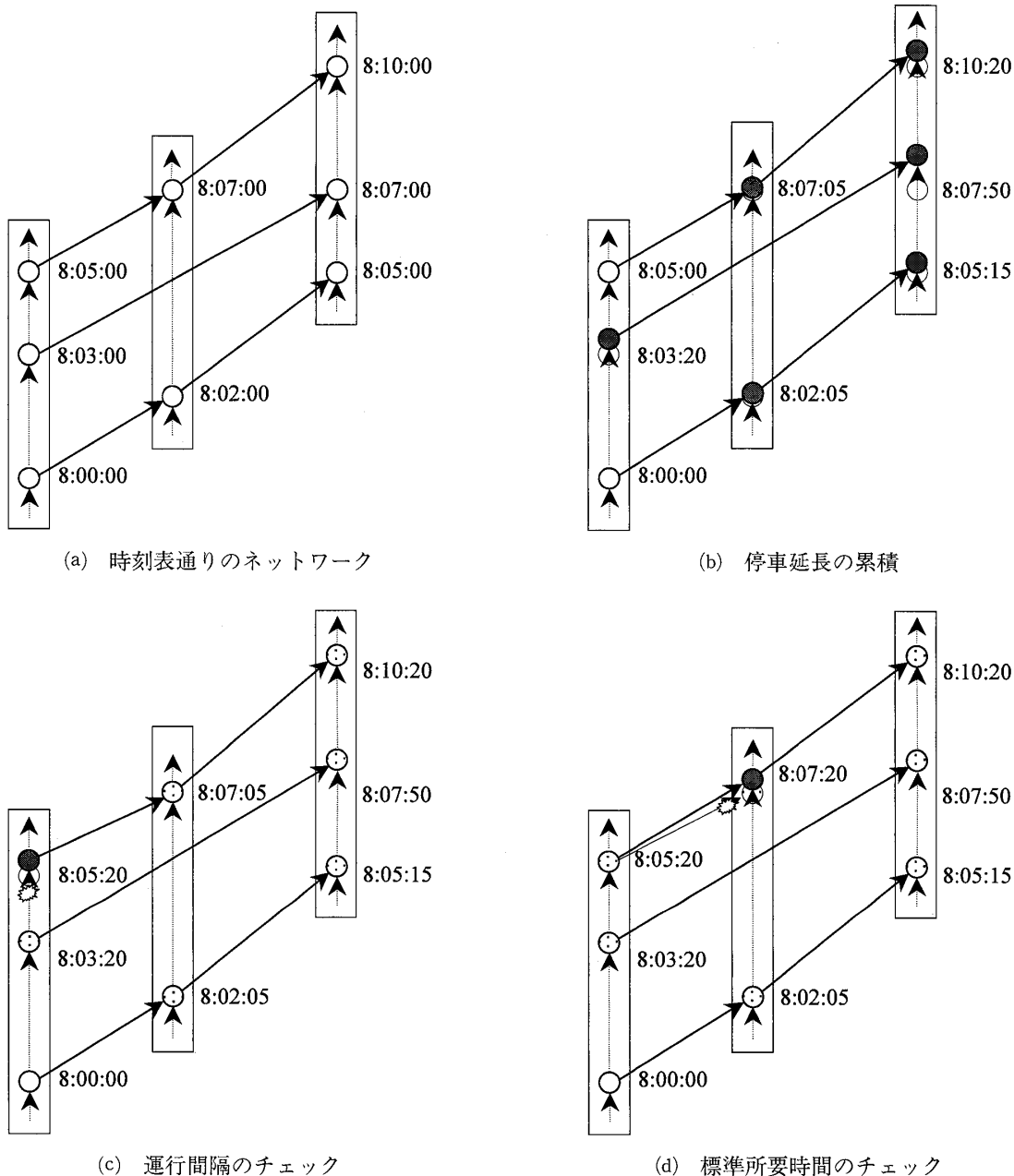


図6 遅延計算アルゴリズム

ラッシュ時に地震が起きたとすると、走行中の電車の事故とそれにとまなう乗客の被災が、広い範囲で起こることが大きな問題であると考えている。走行中の電車の乗客はピーク時には約120万人にのぼる。時空間ネットワークを用いて、通勤客を走行中の電車に割り振り、駅間の電車の走行速度パターンを仮定すると、各時刻における電車の空間分布とその速度および乗車人数がわかる。震度から電車事故と乗客の被災の程度を推定することができれば、乗客分布を震度分布と重ねることにより、被害者の空間・時間分布が得られる。また、都心では地下鉄が発達しているのが特徴の一つであり、最も多いとき（8時15分ごろ）には約40万

人の乗客が地下鉄を利用している。地下鉄は地震には強いといわれているが、トンネルに閉じこめられ、電気が供給できなくなった場合の行動を考えると、これも大きな問題である。以上の内容について、実際のデータから得られる結果に、エイヤツと仮定した関係を適用して得られた被害想定を文献[10]にまとめてある。これまで述べた応用問題は、交通配分という観点でとらえると、大都市交通センサスの移動データを“整理”して得られる内容で、人目を惹くものを選んである。これに対して、出発駅と目的駅、ならびに出発時刻（か到着時刻）が与えられたときに、通勤客を電車に割り振る交通配分問題が解けると応用が広がる。こ

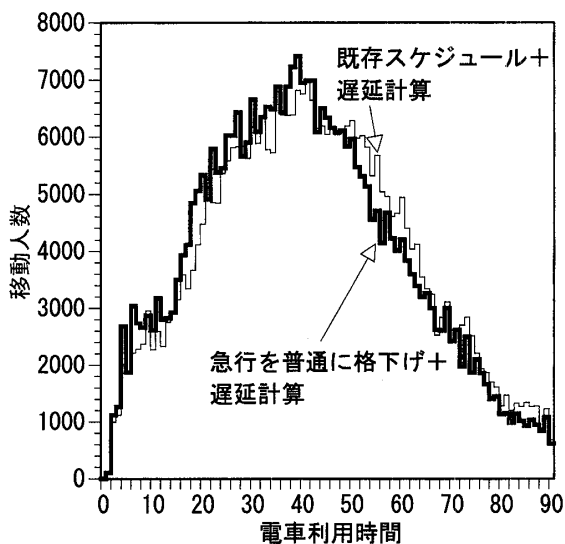


図7 逆転の発想による遅れ緩和の効果

## 参考文献

- [1] 『平成12年大都市交通センサス』, 財団法人運輸政策研究機構, 2002.
- [2] 『MATT 関東圏 JR 線私鉄線時刻表』, 八峰出版株式会社, 2002.
- [3] 松井寛他, 『交通ネットワークの均衡分析』, 土木学会交通ネットワーク小委員会編集, 1998.
- [4] N. H. M. Wilson and A. Nuzzolo, eds, "Schedule-Based Dynamic Transit Modeling: Theory and Applications," Springer, 2003.
- [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, 鹿島茂, 鳥海重喜, 齊藤正俊, 「首都圏の実時間鉄道利用者流動推計システムの構築」, 運輸政策研究, 8 (2005), 31-35.
- [7] 田口東, 「首都圏電車ネットワークに対する時間依存通勤交通配分モデル」, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, 48 (2005), 85-108.
- [8] 高橋幸雄, 森村英典, 『混雑と待ち』, 朝倉書店, 2001.
- [9] 鳥海重喜, 中村幸史, 田口東, 「通勤電車の遅延計算モデル」, オペレーションズ・リサーチ, 50 (2005), 409-416.
- [10] 鳥海重喜, 川口真由, 田口東, 「首都直下地震による鉄道利用通勤・通学客の被害想定」, オペレーションズ・リサーチ, 53 (2008), 111-118.

れに対しては、どの路線に乗るか、急行か普通か、という通勤客が行っている選択に対して、個人の費用関数を混雑と所要時間の関数として導き、利用者均衡配分問題として定式化することができる。問題の規模がかなり大きくなるものの、時空間ネットワークの構造が簡単なおかげで、実用的な時間で解を得ることができる。これを使って、新線建設の効果、時差出勤の有効性など、定性的に論じられている問題を、かなり定量的に議論することができる[6][7]。文献[4]には興味深い話題が集められており、海外でも電車への関心があることが分かる。