

首都圏鉄道運転調整のネットワーク全体への影響と分散乗車

田口 東

東日本大震災後の電力節減に対応するために、首都圏鉄道では運転本数が削減され激しい混雑が生じた。公共交通機関というだけあって、利用者はストレスなく路線を乗り継いでいる。一方、乗客の流れとそれを運んでいる電車の運行を、事業者単位では把握しているが、ネットワーク全体でみるという視点が平常時から欠けている。混雑を和らげる決め手は分散乗車である。ここでは、ネットワーク全体を対象として、分散乗車の詳細なシミュレーションを行い、その効果が実現目標として提示できることを示す。これは、各事業者が閉じた計画を立てたのでは、利用状況への影響が十分把握できず、偏った利用者負担による不公平感が生ずる可能性があること、事業者ごとの電力削減目標を基にした運転計画を総合してネットワーク全体の混雑を計算し、削減目標を調整するというプロセスが必要であると考えられている。

キーワード：時空間ネットワーク、分散乗車、首都圏鉄道網、利用者均衡

1. 広範囲なネットワークによるシミュレーションの必要性

首都圏の公共交通機関では、東日本大震災に起因する電力供給不足に対応するため、震災発生の次週から、電車運転本数の削減、優等電車の取りやめなどが実施された。このときには、路線によって、到着した電車に乗り込めない、乗換駅で改札制限が行われる、など非常に激しい混雑が生じた。一カ月程経ってから、電力需給の調整がなされ、朝夕のラッシュ時には従来通りの運転、昼間には多少削減された運転がなされており、平静な状態に戻った。ここでは、災害発生直後の緊急時対策ではなく、復旧の調整時期の対応について考える。

首都圏の公共交通機関は30の事業者、130路線、1,800駅、通勤時間帯に800万人の通勤通学客と8,000本の電車（いずれも概数）からなる大規模で広範囲なネットワークを形成している。通勤客の多くが、朝の短い時間に、複数路線を乗り継いで郊外から都心部へ移動してくるので、時間・空間の両面で集中して混雑が発生する。ネットワークを構成する路線は、その中で次のような特徴を持っている。

- ・ 郊外から都心へ通勤客を運ぶ

- ・ 都心に到着した通勤客を引き継いで最終目的駅まで運ぶ
 - ・ 強力な代替路線がある
 - ・ 並走する路線が少なく、ほぼ独立して輸送する
- 筆者が課題と考えているのは次の点である。公共交通機関というだけあって、利用者は、ストレス無く路線を乗り継いで移動し、それが相互乗り入れ、駅改良工事などによって促進されている。一方、乗客の流れとそれを運んでいる電車の運行を、事業者単位では把握しているが、ネットワーク全体でみるという視点が平常時から欠けていることである。

電車の輸送能力が大きく削減され、それが長時間続いて利用機会が繰り返される場合には、電車の利用状況に過渡的な混乱があり、その後、均衡状態に落ち着く。前述の様な電車網の特徴と、さまざまな代替路線があることを考えると、一時的状態でも均衡状態でも、平常時の利用路線における削減だけではなく、ネットワーク全体の運転状況が利用者に影響する。

電車の混雑を和らげる決め手は、利用者による分散乗車である。ここでは、ネットワーク全体を対象として、分散乗車の詳細なシミュレーションを行い、分散乗車の効果が具体的な実現目標として提示できること、混雑が著しく偏っていないかを調べられることを示す。これは、それぞれの事業者が営業する範囲内で閉じた計画を立てたのでは、利用状況への影響（電車混雑）が十分把握できず、利用者負担が偏るために不公平感が生ずる可能性があること、したがって、事業者ごと

の電力削減目標を基にした運転計画を総合してネットワーク全体の混雑を計算し、最初の削減目標を調整するというプロセスが必要であると考えられている。

2. 首都圏電車ネットワークのモデル化

東京首都圏の電車網に対して、時刻表通りに電車を運行させ、通勤通学客の移動を再現するモデルを提案している[2]～[7]。モデルは下記の要素で構成される。

■通勤通学客の移動データ（大都市交通センサス）

2000年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、平日の一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、途中の乗換駅、利用電車の種別（「普通電車」と「優等電車」に区分する）が乗客ごとに記述されたデータを利用する。全体で約800万人の定期券利用者がおり、約30万人がサンプルとして選ばれている。

■時空間ネットワーク

図1を用いて時空間ネットワークを説明しよう。各駅における各電車の着発を一つの頂点に対応させる。これらの頂点間に、乗客の移動を表す枝を定義する。まず、電車運行を表すために、電車の発と着を表す頂点間に枝（走行リンク、図の実線と二重線）をはる。次に、同一駅にある頂点を時刻順に並べて、連続する頂点間を枝（待ちリンク、垂直な点線）でつないで、電車の待ちを表す。最後に、乗り換え可能な駅に対して、徒歩移動に対応する枝（乗換リンク、一点鎖線）をはる。

大都市交通センサスのOD交通需要をこのネットワークに負荷する。各駅に対して、その駅を最終到着駅とする乗客を15分ごとの時間帯にまとめてシンク頂点を作り、その時間帯の着電車を表す頂点から枝

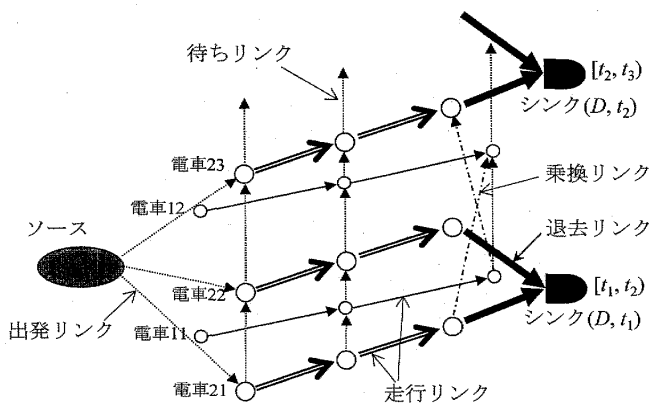


図1 時空間ネットワーク

（到着リンク，太い網掛け）をはって乗客を流出させる。各駅に対して唯一のソースを作り，ソースから，発電車を表す頂点へ枝（流入リンク，破線）をはって，ネットワークへ乗客を流入させる。

■利用者均衡配分問題

各枝に旅行時間と混雑度の関数であるコストを定義し，経路のコストは含まれる枝のコストの和とする。また，すべての旅行者に対してコスト関数は同一であると仮定する。電車走行リンクに対して次の関数を用いる。

$$\varphi_a(u_a) = t_a \left(1 + \gamma \left(\frac{u_a}{c_a} \right)^\alpha \right) \quad (1)$$

u_a は枝 a に対応する電車の乗客数， c_a は電車の定員， t_a は駅間旅行時間であり， γ と α はパラメータである。乗換リンクと待ちリンクのコストは所要時間に等しく，出発リンクと到着リンクはコスト0とする。

利用者は Wardrop の第一原理にしたがって経路選択を行うと仮定し，それぞれのソースとシンクに間に複数存在する経路の中で，利用されている経路のコストは等しく，利用されていない経路のコストはそれと等しいか大きいという均衡状態に落ち着くことを期待する。単純な最短経路問題の解では一つの（最短）経路に流れが集中してしまう。しかし，コストを旅行時間と流れに依存する混雑度の関数とすることによって，最短時間の移動を重要と考える利用者と，時間を多少犠牲にしても混雑を避けたい利用者との状態を表せる。

図2に走行リンクのコスト関数を示す。横軸は乗車率，縦軸がコストである。図中の1aと1bは大都市

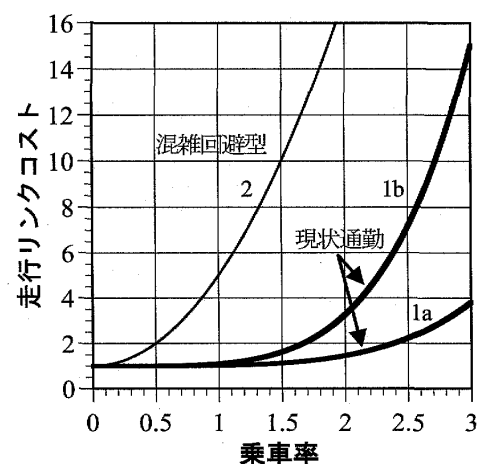


図2 電車走行リンクのコスト関数

交通センサスに記録された乗客の経路選択とモデルを使った計算結果とが良く合うように式(1)のパラメータを定めた結果である (1a は始発から7:30 まで, 1b は7:30 以降)。これは旅行時間に大きな重みがついている。また, 乗車率に対する重みを大きくして, 分散乗車を強制するようなコスト関数2を設定する。

3. 運転調整の影響と分散乗車の効果

電車運転本数が一律 20% 削減された場合を考える (路線ごとに削減率が異なっても方法は同様である)。電車の混雑を調べることが目的なので, 難工事となるダイヤグラム変更の代替として, 電車容量を 80% に削減する。次のような利用者行動を想定して平常時と比較する。

- (1) 到着時刻は平常時のまま, 電車選択も平常時の移動時間優先とする。
- (2) 到着時刻に平常時の前後 15 分ずつ幅を持たせ, 利用者は混雑が分散されるよう電車を選択する。
- (3) 到着時間を平常時の前後 45 分ずつ幅を持たせ, 利用者は混雑が分散されるよう電車を選択する。

図 3 は, 平常時と電車容量を 80% に削減した(1)に対するネットワーク全体の乗車率分布を表したものである。横軸が乗車率, 縦軸が各乗車率の電車に乗っている乗客数を駅間ごとに合計した値である。普通電車と優等電車を合計した結果を表示してある。平常時と比較して, (1)では 200% 以上の区間が増加している。このような高い乗車率では, 現実には, 電車と駅構内の混雑によって遅延が発生しやすくなり, ダイヤグラム通りに運転できない。図 4 は分散乗車(2)と(3)の効果を見るために, 乗車率分布を表したものである。(2)でも効果があり, 乗車率の高い区間が, 平常時と同程度

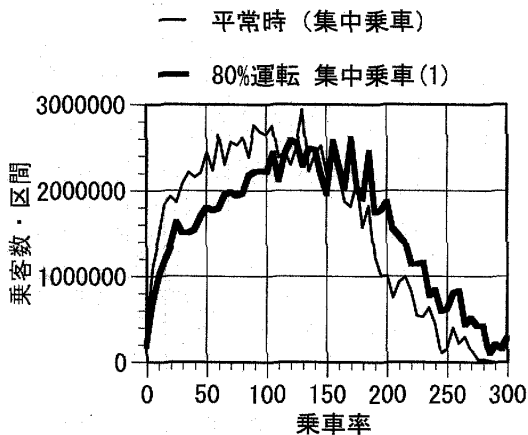


図 3 通常時と 80% 運転削減時の乗車率分布

に抑えられている。分散乗車(3)が実現されると, 平常時よりも混雑が解消されたことになる。

分散乗車の様子と, 効果が現れる路線, 効果が上がりにくい路線があることをみる。図 5, 6 はそれぞれ, 郊外から都心へ向かう路線であり, 図 7 は都心を環状に結び, 都心に到着した乗客を目的駅に運ぶ路線である。グラフ中のカーブは, 朝の通勤時を区分した時間帯の平均乗車率を, 路線に沿って表したものである。

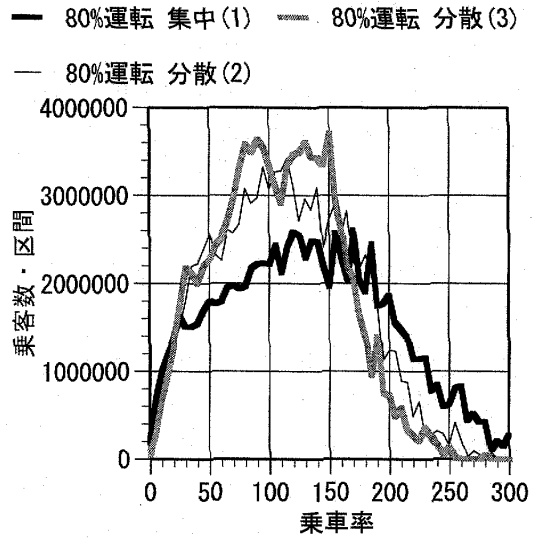


図 4 運転削減時の分散乗車の効果

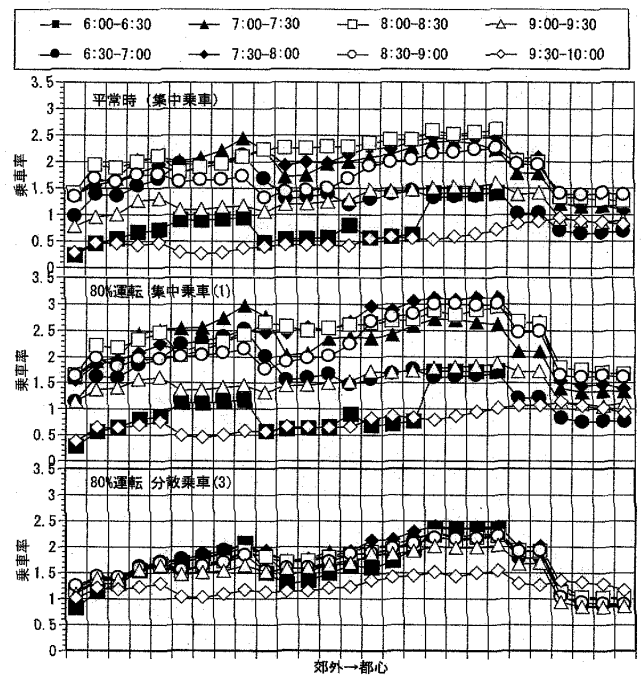


図 5 郊外から都心に向かう路線 A に沿った電車乗車率。併走する路線が無く, 分散乗車の効果が出にくい

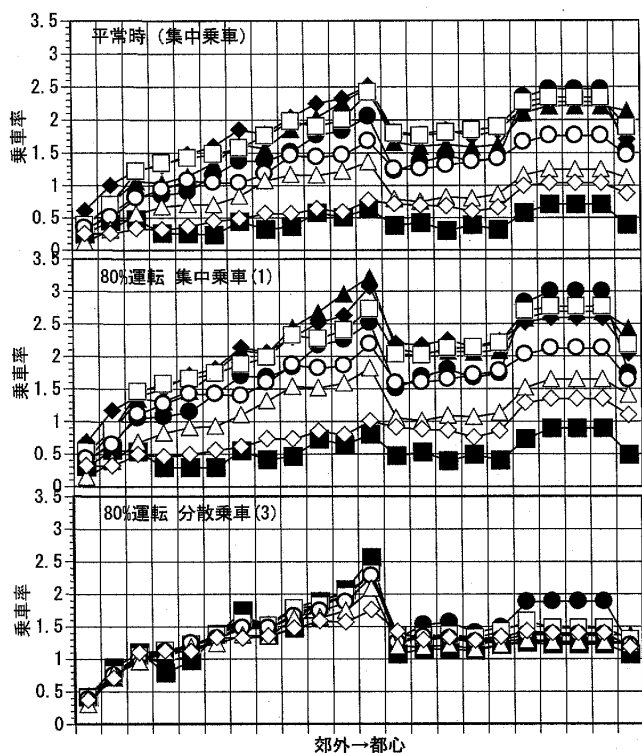


図6 郊外から都心に向かう路線Bに沿った電車乗車率。併走する路線があり、分散乗車の効果が出ている

各図の3個のグラフは、平常時、ケース(1)と(3)に対応している。各図において、ケース(1)では激しい混雑が起きていること、(3)では乗車率が均等になるように分散乗車されていることがわかる。図5の路線Aは併走する路線がないために、図6、7の路線に比べて分散乗車の効果が小さいことがわかる。

図4より、もし分散乗車が実現できれば、ケース(2)の場合でもネットワークのほとんどの区間で輸送能力と通勤通学需要がほぼ釣り合うであろう。しかし、その場合でも、図5のような路線Aでは激しい混雑が残り、接続する駅構内では乗降客があふれる可能性がある。

ネットワーク全体を考えたシミュレーションを行うことによって、路線ごとに計画された時刻表による混雑を評価することができる。そして、参加している事業者がその結果を共有することによって、さらに良い計画をたて、さまざまな資源を事業者間で配分するといった検討が行われることが期待できる。その上で、

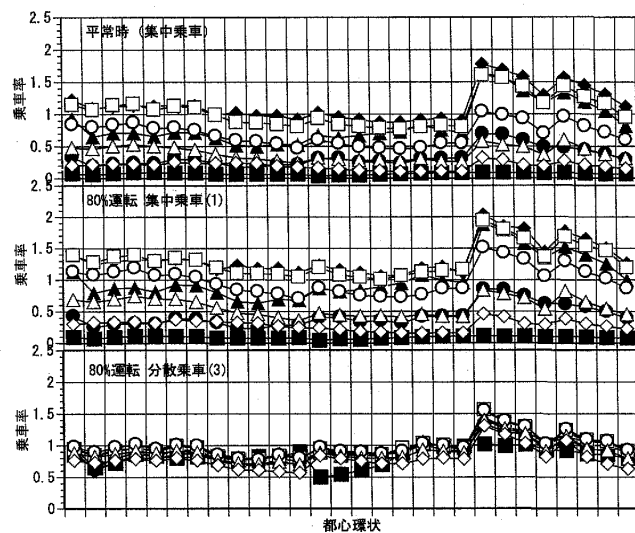


図7 都心環状路線Cに沿った電車乗車率。併走する路線が多数あり、分散乗車の効果が出ている

利用者や企業・教育機関が、可視化された効果を理解することによって、社会的に分散乗車を実現する（強制する）提案への協力が得られることが期待される。

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] 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。
- [3] 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—領域型時空間ネットワークモデルの活用—」，運輸政策研究，8（2005），31-35。
- [4] 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。
- [5] 田口東，「時差出勤のパラドックス」，オペレーションズ・リサーチ，50（2005），555-559。
- [6] 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。
- [7] 田口東，「鉄道の通勤利用モデルとソフトな混雑緩和」，オペレーションズ・リサーチ，53（2008），433-438。