

# 時差出勤のパラドックス

田口 東

## 1. 首都圏電車ネットワークのモデル化

東京首都圏において電車を毎朝通勤通学に利用する人は約800万人にのぼる。首都圏在住の約10,000人を対象とした4日間（金、土、日、月）の行動履歴から目的別の電車乗車人数の時間変化を調べると図1のようである。平日朝7時から8時台に通勤・通学客が集中し、帰宅のラッシュはそれよりはなだらかである。混雑解消のために電車の本数を乗客に合わせて増発するには限界があり、一方、ラッシュ時間帯前後は比較的空いているので、時差出勤による乗客の分散が混雑解消のカギであるといわれている。一方、東京首都圏の電車ネットワークは非常に複雑で広範囲に広がり、乗客の利用も長時間にわたるので、時差出勤の効果をみることは簡単なことではないという主張がある。ここではネットワークの流れ配分モデルを使って、時差出勤の問題を考える。その際に、朝のラッシュ時に乗客が集中して郊外から都心部へ移動するという需要の時間的な変動が非常に大きいことを考えると、流れの時間変化を陽に取り扱う解析が必要である。また、路線がネットワーク状に発達していて、注目する電車区間を限定してもそこに影響を与える乗客の移動範囲は非常に広いと考えられるので、広い範囲の電車網を扱

う動的な問題を考えたい。

利用客の出発地と目的地間の交通需要（以後OD (Origin Destination) 交通需要という）が与えられたとき、乗客を利用経路に配分するためには、利用者均衡配分問題を解くのが代表的な手法の一つである。この問題では、各経路に対して利用者が負うコスト関数を与え、利用者は経路選択に必要な情報をすべて持っていて、自分にとって最適な経路を利己的に選択すると仮定する。そして、同一の出発地目的地間で異なる経路がある場合に、利用されている経路のコストはすべて等しく、利用されていない経路のコストはそれよりも等しいか大きいという状態（均衡状態）を求めるものである。これはWardropの第一原理と呼ばれる[4]。一般的な動的均衡配分問題を解くことは非常に難しい。しかし、時刻表通りにレールの上を走る電車に対しては、時間変化が確定していることを利用して、乗客の動的な流れを静的なネットワーク（乗換ネットワーク）の流れとして表現することができる[2, 3, 5]。この方法は、扱うネットワークが大規模になるという欠点がある一方で、時間軸方向の近似や乗客の集約をすることなく、時々刻々駅に到着する乗客の移動を正確に表現できるという特長がある。しかも、構造が大変に簡単でかつ静的であることを使ってネットワ

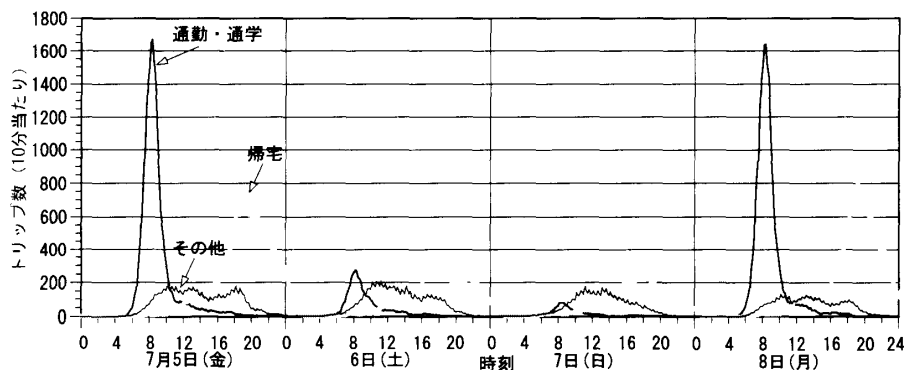


図1 目的別首都圏鉄道利用状況 (JR 東日本(株)駅消費データ調査2002年より編集)

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

ークフロー問題が高速に解ける。

得られる結論は、数理計画問題の解として当然であるが、社会的に興味深い。出社時刻を分散させた場合に、現状の混雑を大きく解消する交通配分が実現できる。しかし、出社時刻を分散させていながら、現状と同程度に混雑する配分を得ることもできる。後者は、現実の乗客の流れをよく表現している旅行時間を重視するコスト関数を用いた場合、前者は、混雑回避を重視する仮想的なコスト関数を用いた場合に得られる。このことから、フレックスタイムを導入して通勤時間帯の分散をはかるだけでは効果は小さく、通勤時間が多少長くなっても混雑しない電車を利用してその間を有効に利用する、または、楽しみを見つけるという意識が重要であることが示唆される。

## 2. 大都市交通センサスと乗換ネットワーク

対象としたのは首都圏の電車網 128 路線 1,815 駅 (図 2) における平日の朝の通勤時間帯に運転されるほぼすべての電車約 7,500 本である。電車の時刻表からネットワークを作成し、大都市交通センサスを用いて時間依存の OD 交通需要をまとめて均衡配分問題を解く。

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]。ここでは 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 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、途中の乗り換え駅、利用電車の種別 (以降では「普通電車」と、その他を「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あり、約 30 万人がサンプルとして選ばれている。

図 3 を使って乗換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と到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間が経過する順序に並べて、その間を順に枝 (待ちリンク、垂直な点線) でつないで、電車の待ちと乗り換えを表す。最後に、徒歩で乗り換える駅対に対して、移動元の駅にある頂点から、移動先の頂点のうち駅間所要時

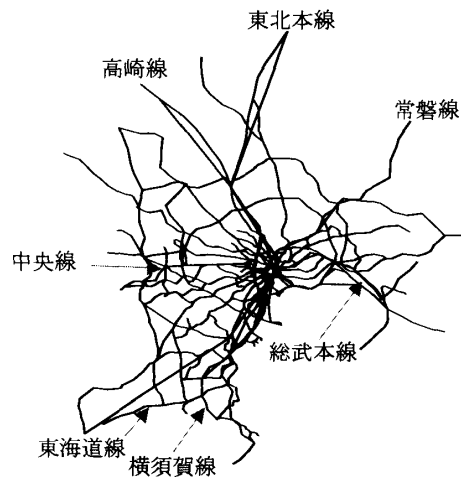


図 2 計算対象とした首都圏電車路線。128 路線、1,815 駅

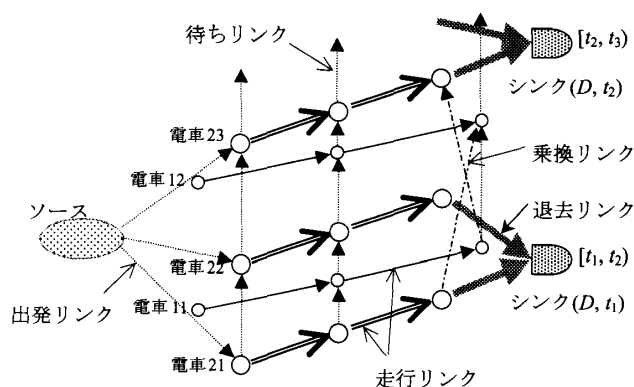


図 3 乗換ネットワーク

間を加えて間に合う最早の頂点に枝 (乗換リンク、一点鎖線) をはって、乗り換えの移動を表す。

大都市交通センサスの OD 交通需要を均衡配分問題の入力とするために、ネットワークに流入する乗客に対応するソースと、ネットワークから流出する乗客に対応するシンクを作る (網掛け)。まず、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、その時間帯に発着する電車を表す頂点から枝 (到着リンク、太い網掛け) をはって乗客を流出させる。ネットワークへの流入は、各駅に対して (時間によらない) 唯一のソースを作り、ソースから、各電車の駅からの出発に対応する頂点へ枝 (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。

## 3. 利用者均衡配分問題の定式化

ネットワークにおいて各枝に旅行時間と混雑度の関数であるコストが定義され、経路のコストは含まれる枝のコストの和であるとする。旅行時間は枝ごとに一

定値であり、混雑度は乗客数の関数である。そして、すべての利用者に対してコスト関数は同一であると仮定する。具体的には電車走行リンクに対して次の関数を用いる。

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

$u_a$  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、 $\gamma > 0$  と  $\alpha > 0$  はパラメータである。また、乗換リンクと待ちリンクのコストは所要時間に等しく、出発リンクと退却リンクはコスト 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の間には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。一方、ここで考える利用者均衡配分問題は、すべての人が同一のコスト関数を持ち、最小コストの経路を選ぶというように単純化されているが、流れに依存するコスト関数を用いることによって、複数の経路が選択される現実に近い配分を考慮することができる。コストを旅行時間と混雑度の関数とすることによって、最短時間の移動を第一に考える利用者と、時間を多少犠牲にしても混雑を避けて普通電車を利用する利用者とは、複数の経路（路線）や優等電車と普通電車とに分散して利用している状態を表すことを想定している。

すでに大都市交通センサスに記録された乗客の経路選択とよく合うように式(1)のパラメータを次のように定めてある[6]。これは旅行時間に大きな重みがついている。

$$7:30 \text{ まで } \phi_a(u_a) = t_a \left( 1 + 0.02 \left( \frac{u_a}{c_a} \right)^{4.5} \right),$$

$$7:30 \text{ 以降 } \phi_a(u_a) = t_a \left( 1 + 0.1 \left( \frac{u_a}{c_a} \right)^{4.5} \right) \quad (2)$$

また、混雑を避ける行動を表すために、乗車率に関する重みを大きくしてパラメータを設定する。

$$\phi_a(u_a) = t_a \left( 1 + 4 \left( \frac{u_a}{c_a} \right)^2 \right) \quad (3)$$

定式化と解法の詳細は参考文献[3, 6, 7]を参照されたい。

#### 4. 時差出勤のモデル

職場最寄り駅への到着時刻を分散させるためにシン

クへの到着リンクをつける電車の範囲を広くする。センサス回答を 15 分ごとにまとめた乗客到着時間幅に入る電車にリンクをつけた場合を[集中]とし、電車到着の時間範囲をそれから前に 60 分、後ろに 45 分広くして到着リンクをつけたものを[分散]とする。そして、それぞれの時間幅のケースについて、現在の配分とよく一致する旅行時間重視のコスト関数(2)を用いた場合を[時間重視]、混雑回避重視のコスト関数(3)を用いた場合を[混雑回避]と表す。計算結果を次の二つの指標を用いて整理する。

**駅間乗客数と乗車率**：各路線において、引き続き二つの駅の間を通過する電車の乗客数を 20 分ごとの時間帯でまとめる。それと同時に駅間を通過する電車の定員の合計を計算し乗客数を割って乗車率とする。

**OD 間平均旅行時間**：ソースとシンクの対それぞれに対して、乗客が出発駅から電車に乗る時刻と目的駅に到着する時刻の差の平均値を OD 間平均旅行時間とする。ここで平均とはソース・シンク対それぞれに対して、2 点間の異なる途中経路について旅行時間を乗客数で加重平均したものである。

図 4 に OD 間平均旅行時間の分布を表す。[時間重視]の旅行時間が短く、[混雑回避]の旅行時間が長い。なかでも到着時刻の自由度が大きい[分散\_時間重視]の旅行時間が最も短くなっている。[集中\_混雑回避]の旅行時間が長いのは、普通電車による移動が多いだけではなく、早い時間に出発して、混雑を避けるために、指定された到着時刻になるように駅で時間を過ごすという不自然な時間の使い方を含んでいることによる（早く出社することは許されない）。[分散\_混雑回避]が上記の不自然な滞留をあまり含んでおらず、通勤時間帯の分散と普通電車と優等電車への分散を行った場合の旅行時間分布であり、[集中\_時間重視]と大きな差がみられない。

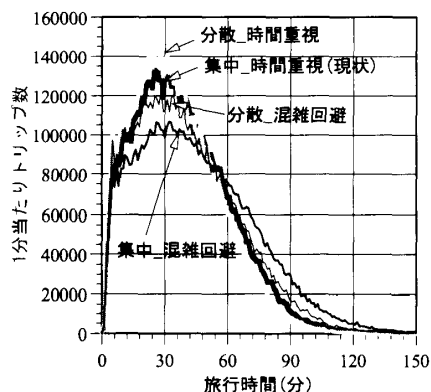


図 4 OD 間平均移動時間分布

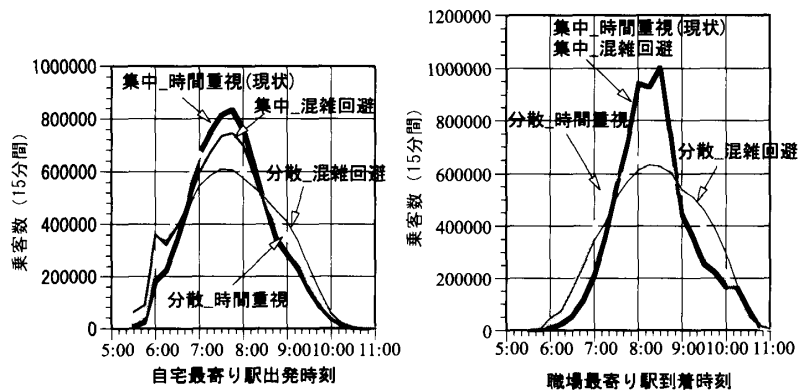


図5 自宅最寄り駅出発時刻と職場最寄り駅到着時刻の分布

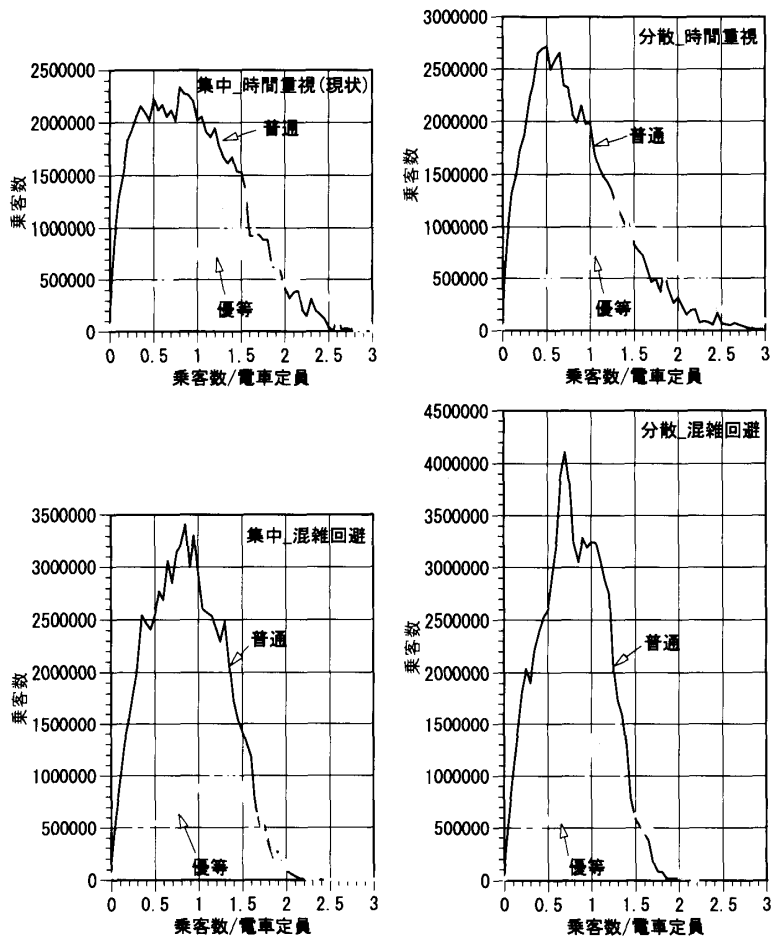


図6 出社時刻の分散と現状(集中), コスト関数の違い(時間重視と混雑回避)による乗車率の比較

図5に自宅最寄り駅出発時刻と職場最寄り駅到着時刻の分布を示す。[集中]の[時間重視]と[混雑回避]の到着時刻は、シンクと統計の時間幅が一致しているので、完全に一致している。[分散]の[時間重視]と[混雑回避]とも出発時刻、到着時刻はよく分散しており、時差出勤が実現されていることが分かる。最後に、肝心の混雑度を見てみよう。図6に駅間乗車率0.1ごとにその時の乗客人数を合計したグラフを示す。まず、

[混雑回避]では普通電車がよく利用されて乗車率分布が低い方に移動している、時差出勤に期待される効果が上がっていることが分かる。しかし、[分散\_時間重視]では、時間的に分散乗車が行われているにもかかわらず、普通電車はさらに空き、優等電車が一層混雑するという結果になっている。このことから混雑緩和には乗客の意識の変化が重要であることが示唆される。

## 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] 家田仁, 赤松隆, 高木淳, 畠中秀人: 利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価. 土木計画学研究論文集, 6 (1988) 177-184.
- [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] R. B. Potts and R. M. Oliver: *Flows in Transportation Networks* (Academic Press, 1972).
- [5] 志田州弘, 古川敦, 赤松隆, 家田仁: 通勤鉄道利用者の不効用関数パラメータの移転性に関する研究. 土木計画学研究講演集, 12 (1989) 519-525.
- [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] 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.