

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

田口 東
中央大学

(受理 2004 年 6 月 8 日; 再受理 2005 年 3 月 18 日)

和文概要 本論文では、東京首都圏の電車を利用する通勤通学客を対象として、利用者均衡に基づいて、出発駅から到着駅への交通需要をほぼ時刻表の通りに運行される電車に配分するモデルを提案する。乗客は朝の定期券利用者のうち約 700 万人を対象とし、電車は JR 線私鉄線合計 128 路線の始発電車から午前 10 時台に終着駅に到着する通勤電車のほとんど（約 7500 本）を対象とする。電車のダイヤおよび交通需要が時間依存である場合を扱うために、電車の時刻表を基に、各駅における各電車の発着をそれぞれ頂点で表し、駅間の電車の運行を頂点間の枝で表してネットワークを作成する。これによって、確定した離散的な時間の経過を頂点間の移動で表すことができるので、電車ネットワーク上の移動を計算する問題を静的な利用者均衡配分問題として定式化することが可能となる。そして、2000 年に行われた大都市交通センサスデータから OD 交通需要を求めて利用者均衡配分を計算し、同じセンサスに記録された実際の乗客の移動と比較して計算結果の妥当性を確かめる。その上で、応用問題として時差出勤による混雑緩和の可能性を調べることで、南北線全線開通にともなう乗客数変化の予測を行って実際の利用数と比較することを行う。ここで提案した手法によって、首都圏のような広い範囲の公共交通機関を利用する移動に対して、詳細な検討を行うことができるひとつのツールが得られたと考えている。

キーワード: 交通, 数理モデル, ネットワークフロー, 最適化, シミュレーション, 公共サービス

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と列車の公共交通機関を毎朝通勤通学に利用する人は約 800 万人にのぼる。図 1(a) に、利用者数を移動距離（出発駅目的駅間直線距離）1km ごとにまとめ、定期券利用と普通券利用に分けて、目的駅到着時間帯別に表した分布を示す。定期券利用者の移動距離は普通券利用者に比べて長く、朝、乗客が集中する 7 時から 8 時台の利用者の多くは定期券利用者であることがわかる（大都市交通センサス [8]）。

このように利用者の多い交通網をよりよいものにするために様々な計画が立てられている。各地域間のアクセスを良くすること、また、朝夕のラッシュ時の混雑を緩和することを目的として、新路線が建設されたり、需要側の平均化をはかるように時差出勤が奨励されている。このような施設や需要の変化に対して、その影響を予測したり計画を評価したりするために、乗客の流れを詳細に計算できることは非常に有益である。このためのモデルを考える上で、朝のラッシュ時に郊外から都心部へと乗客が多数移動し、早朝と昼間には少ない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（以下 OD(Origin Destination) 交通需要という）が

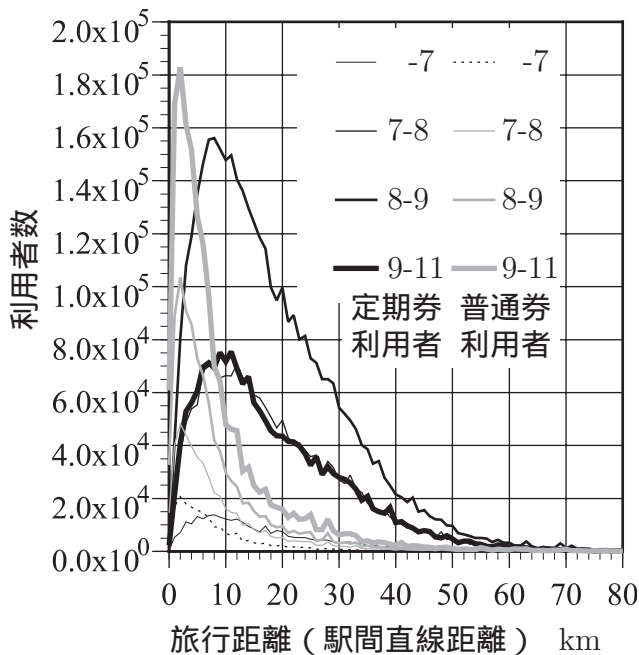


図 1 (a): 東京首都圏電車網における定期券と普通券利用者の時間帯別旅行距離分布 [8]

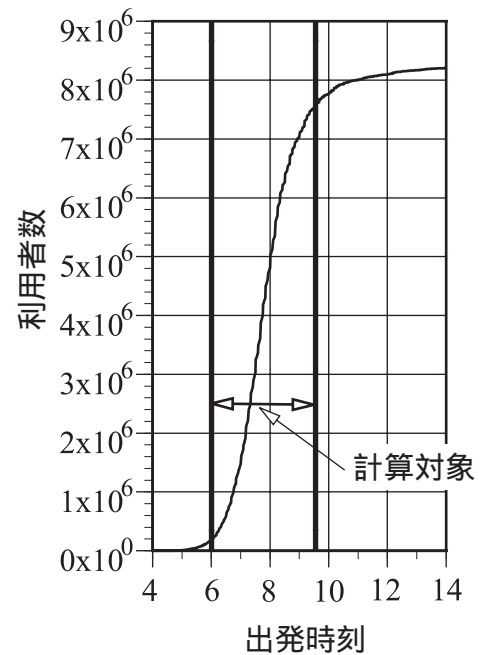


図 1 (b): 定期券利用者の出発時刻による累積人数 [8]

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大きい（等しいという状態（均衡状態）を求めるものである．一般に，動的な利用者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（公共交通機関）に対しては，時間変化が離散的であることを利用して，駅のコピーを電車の発着ごとに作ってそれらの間を電車の駅間移動を表す枝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とができる [2][3]．このようなネットワークを使っていくつかの路線に対して乗客の配分を行った解析が多く報告されている（たとえば [1][5]）．この方法は，扱うネットワークがもとのネットワークにくらべて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ークフロー問題が高速に解ける．さらに，このネットワークに見合う詳細な乗客データとして大都市交通センサスの定期券利用者に対する利用者調査を用いることができる．

本論文では，この計算を首都圏の電車網のように広い範囲のネットワークを対象として行う．具体的には図 2 に示す範囲の 128 路線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を対象として，電車の時刻表からネットワークを作成する．そして，大都市交

通センサスから定期券利用者のうち約 700 万人に対する時間依存の OD 交通需要をまとめて均衡配分問題を解き，計算結果が大都市交通センサスの利用経路とどの程度一致するかを確かめる．その上で，応用問題として時差出勤による混雑緩和の可能性と，南北線全線開通にともなう乗客数変化の予測について調べる．

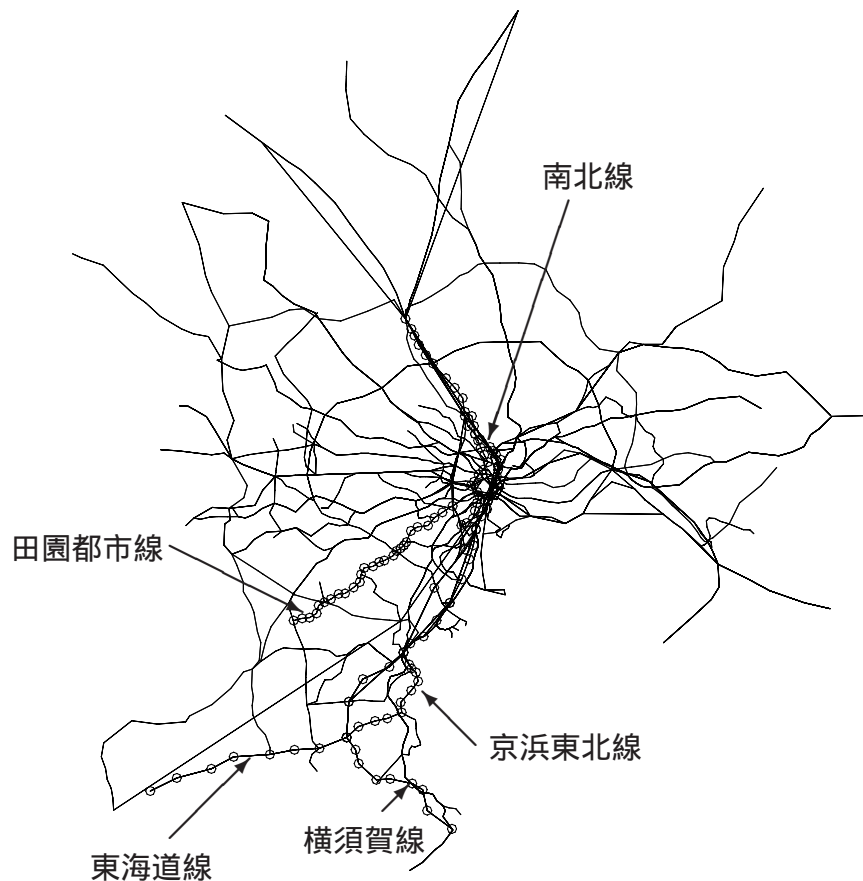


図 2: 計算の対象とした首都圏電車路線（4 章で調べる路線を駅に○を描いて示す）

2. 大都市交通センサスと乗換ネットワーク

最初に，本論文で行う計算の重要な要素である大都市交通センサスについて述べ，時間変化を含む利用者均衡配分問題を考えるネットワークを導く．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 [8]．ここでは 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，上記の週の平日の 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間と到着時刻，途中の乗り換え駅，利用電車の種別（「普通」「快速」「急行」「特別料金が必要」「新幹線」に分類，以下では「普通」とその他をまとめた「優等」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．また，その他に普通券による電車利用者およびバス利用者の調査がある．しかし，これらに対しては粗いデータしか蓄えられていない．たとえば，普通券利用者のデータは，1 時間あるいは 2 時間の時間帯にまとめた出発駅と目的駅間の利用者数の集計値しかない．このように個々の利用者の

移動経路に関する情報が得られないことと、図 1(a) に示すように朝のラッシュ時間帯における普通券利用者の役割が小さいことから、定期券利用者だけを対象とする。図 1(b) は定期券利用者の出発時刻による累積人数である。その中で 6:00 から 9:30 までに出発した利用者を以下で行う計算の対象としている。

乗換ネットワークの作成

大都市交通センサスでは、電車網が路線単位で蓄えられている。駅は同じ構内であっても路線が異なれば異なるコードが割り当てられている。駅座標を国土地理院数値地図 2500 (空間データ基盤) のデータから取得して、図 2 に示す電車路線図を作る。この図には路線が 128、駅が 1815 ある。この地図上のネットワークを基礎として、時間依存の現象である電車 1 本ごとの駅間移動および、乗客の各駅における乗り換えを、頂点と枝で表現するネットワークを作成する。首都圏の通勤電車を主な対象とした時刻表 [9] を用いて、平日の朝 5:30 以降に始発駅を発車し、11:00 までに終着駅に到着するほぼすべての電車を対象として、電車ごとに停車駅と停車時刻を調べる。ただし、時刻表の電子データが入手できなかったので、停車時刻に関してのみ少し簡略化しており、時刻表とは数分ずれている場合がある。ここで考えるネットワークは時刻表のある交通機関を扱う標準的な手法であり、時間変化する流れを静的なネットワーク問題として扱える特長がある [2]。このネットワークを以下では乗換ネットワークと呼ぶ。先行研究にならうと領域型時空間ネットワークとよぶことができるが、ここでの利用方法を表す簡素な用語を用いることにする。

まず、交通センサスで異なるとされる駅の対に対して、同一構内において乗り換えに特別なコストのかからないとみなせる駅対 (同一駅) と、改札口を通して徒歩による乗り換えのある駅対 (乗換駅) を選び出す。このために、同名もしくは似通った名前の駅、交通センサスに実際に乗り換える記録がある駅対を拾い出して、駅間の距離、駅の構造、事業者などを調べ、個別に判断して同一駅か徒歩による乗換駅かを決定する。

例を使って乗り換えネットワークの作り方を説明しよう。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 は縦軸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。各駅における各電車の着発をひとつの頂点に対応させる。電車の到着と出発とを分けて停車状態を表すことがあるが、参照した時刻表にはほとんどの駅でひとつの時刻しか記載されていないことから、着発を区別せずにひとつの頂点で表すことにする。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) 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 の垂直な点線)。最後に、徒歩により乗り換える駅対に対して、駅間の直線距離を分速 55m で割った値に 2 分を加えて所要時間とし、移動元の駅にある頂点から、移動先の頂点のうち所要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 の一点鎖線)。

大都市交通センサスの出発駅と目的駅との間の交通需要をネットワークフロー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 (図 5)。まず、各駅に対して、その駅を出発する乗客を 15 分ごとの時間帯にまとめて対応するソース頂点を作り、その時間帯に発車する電車を表す頂点へ枝 (出発リンク、図 5 の太い網掛け) をはって乗客を流入させる。次章以降で考える流れ問題では、各シンクからの乗客を異なる種類の流れ (異品種流) として区別する。こ

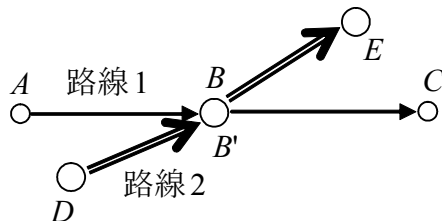


図 3: 電車路線の例

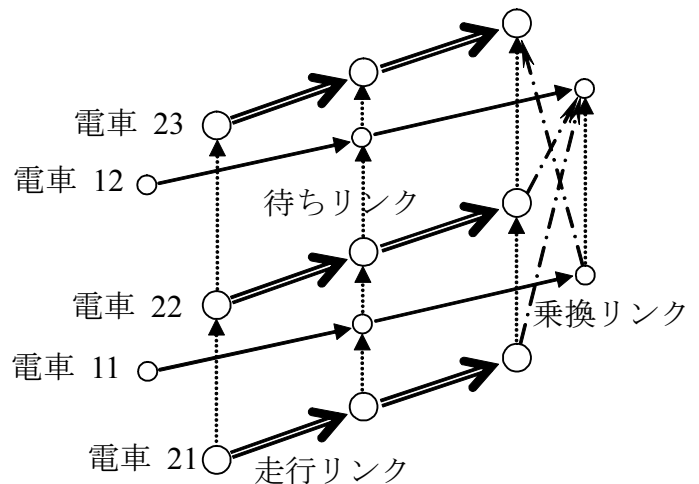


図 4: 乗客の電車移動, 待ち, 乗り換えを表すネットワーク

ここで, 15 分は利用する計算機の容量から定めたものであり, より詳細に解析したい場合にはより細かくする必要がある. この限度は時刻表の精度とセンサデータの回答の精度によって与えられるが, 後者に関していうと時刻について 5 分または 10 分のきりの良い値を答える傾向が強く, それ以上細かくすることには意味がないと考える. ネットワークからの退去は, 各駅に対して (時間によらない) ただひとつのシンクを作り, 各電車の駅への到着に対応する頂点からシンクへ枝 (退去リンク, 図 5 の破線) をはって, 最終到着駅についた乗客を流出させる. センサデータでは到着時間も記載されているが, 出発時間と途中経路の旅行時間と合わせると条件が過剰になるので到着時間は用いない. このようにして作成したネットワークの規模を表 1 にまとめ, 図 6 に図を示す. また, 電車の定員は各社が公表している電車編成表より路線ごとに代表的な値を求めた.

表 1: 取り扱うネットワークの規模

電車ネットワーク		乗換ネットワーク		利用者データ	
駅数	1,815	頂点数	150,064	サンプル件数	216,943
路線数	128	枝数	475,435	代表される人数	6,850,044
電車本数	7,486	異品種流の数	15,942	(全サンプル件数	284,472)

利用者均衡配分問題を定式化する前に, 交通センサスの回答の通りに乗客を乗換ネットワークに配分して, 現状の乗客の利用状況を計算することについて述べておこう. これは, 現在の利用状況を表す様々な興味深い特徴を知るデータとしてだけではなく, モデルの解の基準として用いることができるので重要な意味をもっている. 計算には次のような素朴な方法を用いる. ネットワーク上で各利用者ごとにソースから最初の乗換駅まで, アンケート回答の条件に合う路線と電車種別の枝のみを使って最短経路を求め, 到着した頂点を始点として次の乗換駅までの最短経路を同様にして計算し, 最終目的に到着するまでこれを繰り返す. しかし, アンケート回答に含まれる矛盾点 (たとえば, 回答にある利用駅と電車種別では乗降できないなど) を解決する作業に労力を要するので, 実際には容易な作業ではない.

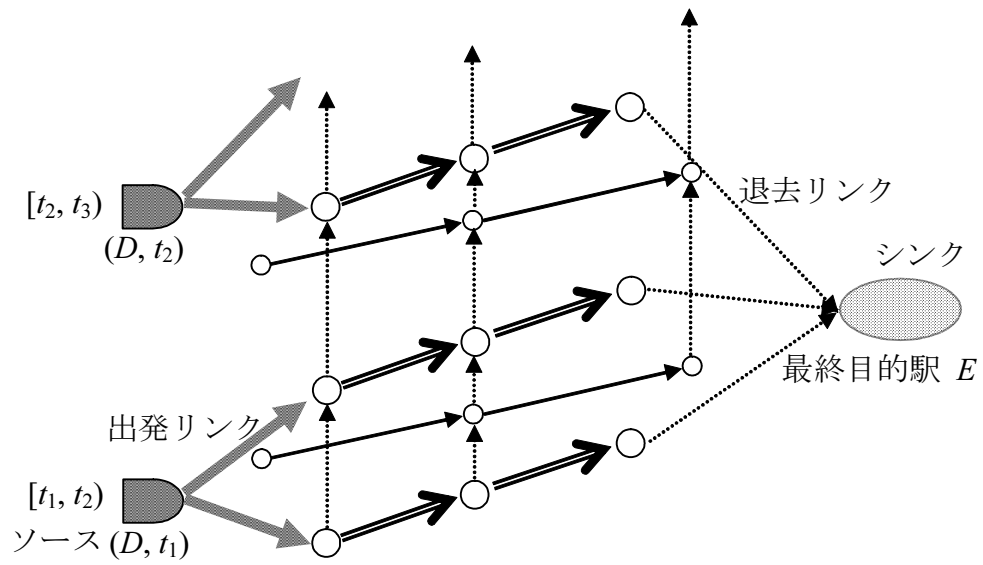


図 5: ソースとシンク

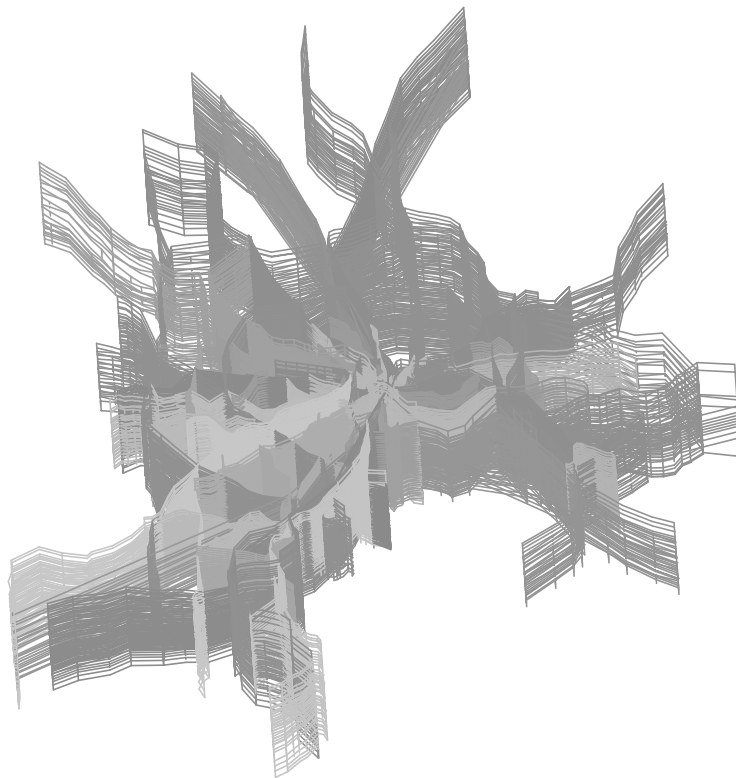


図 6: 首都圏電車路線網に対する乗換ネットワーク（地表面に垂直な方向に時間軸をとり，電車一本一本の駅間の移動を表している）

3. 利用者均衡配分問題の定式化

ネットワークの能力の変更や交通需要の変化などの影響を見るために、OD 需要を仮定し対象とするネットワーク上で乗客を経路に配分する問題を解くことがよく行われる。ここで考えるネットワークの規模が非常に大きいので、出来るだけ単純なモデルでないと解を得ることが難しいという事情があり、次のような利用者均衡配分問題を考えることにする。

各枝には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。また、利用者はネットワークの状態について、将来にわたる完全な情報を持っていて、ソースとシンクの間でもっともコストの低い経路を選ぶと仮定する。これは Wardrop の第一原理とよばれる。この原理にしたがって利用者が経路選択を行うと、それぞれのソースとシンクの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、という状態に落ち着くことが期待される。このように実現される配分を利用者均衡配分とよぶ [2][4]。

単純な最短経路問題の解では出発地目的地間の一つの（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えることができる。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が、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。このような問題に対していくつかの路線を対象とした研究がすでに行われており、乗客の配分がよく再現された結果が得られている [1][5]。ここでは、東京首都圏の全路線という広い範囲を対象とし、居住地と最終目的地を OD としていることが大きな特徴である。

利用者均衡配分問題をネットワークフロー問題として定式化するために用いる記号を説明する。問題の本質的な変数である流れを、出発駅とそこからの出発時刻によって区別して多品種流問題とする。ただし、パーソナルコンピュータで解くことを考慮して、出発時刻を Δ 単位（以下の計算例では 15 分）で出発客をまとめる。たとえば、「品川駅を 9:00 ~ 9:15 に出発した利用者」がひとつの種類の流れとなる。 Δ に関わらず乗換ネットワークの頂点が表す時刻は時刻表の時刻の通りである。

各駅 r に対して時間帯 $[t, t + \Delta)$ (t は Δ ごとの離散的な値) に出発する乗客をひとまとまりとして、対応するソース頂点 $r(t)$ を作り、そこからネットワークに流入させる。ここを出た乗客を流れ $r(t)$ とよぶことにする。 $r(t)$ から出発する乗客数を $f^{r(t)}$ 、そのうちシンク s に向かう人数を $e_s^{r(t)}$ とする。また、枝 a を通過する流れ $r(t)$ の人数を $u_a^{r(t)}$ と表す。図 7 に示す枝と頂点の接続関係を、頂点 i から出る枝の集合を $\partial^+ i$ 、入る枝の集合 $\partial^- i$ のように表す。

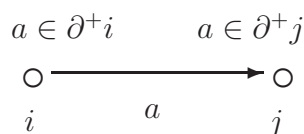


図 7: 頂点と枝の接続

流れ $u_a^{r(t)}$ は次の保存則を満たす．

ソース：ソース $r(t)$ において，与えられた数の乗客 $f^{r(t)}$ がネットワークに流入する．

$$\sum_{a \in \partial^- r(t)} u_a^{r(t)} - \sum_{b \in \partial^+ r(t)} u_b^{r(t)} = - \sum_s e_s^{r(t)} = -f^{r(t)} \quad (\text{すべての } r(t) \text{ に対して}) \quad (3.1)$$

シンク：シンク s において， $r(t)$ を出た乗客のうち目的駅を s とする乗客 $e_s^{r(t)}$ が流出する．

$$\sum_{a \in \partial^- r(t)} u_a^{r(t)} - \sum_{b \in \partial^+ r(t)} u_b^{r(t)} = e_s^{r(t)} \quad (\text{すべての } s \text{ と } r(t) \text{ に対して}) \quad (3.2)$$

中間頂点：ソースとシンク以外のすべての頂点 i において，流れ $r(t)$ の流入流出が釣り合う．

$$\sum_{a \in \partial^- r(t)} u_a^{r(t)} - \sum_{b \in \partial^+ r(t)} u_b^{r(t)} = 0 \quad (\text{すべての } i \text{ と } r(t) \text{ に対して}) \quad (3.3)$$

流れベクトル u ，流入流出ベクトル f ，隣接行列 D を使って，上の 3 種類の保存則をまとめて線形方程式

$$Du = f \quad (3.4)$$

として表す．電車走行リンク a を通る各利用者が被るコストを， a を通過する乗客の和 $u_a = \sum_{r(t)} u_a^{r(t)}$ の関数として $\phi_a(u_a)$ と表す．次章の計算例では，時間と混雑度を取り入れたコスト関数として，

$$\phi_a(u_a) = t_a \left(1 + \gamma \left(\frac{u_a}{c_a} \right)^\alpha \right) \quad (3.5)$$

を用いる． c_a は枝 a の容量（対応する電車の定員）， t_a は枝の旅行時間であり， $\gamma > 0$ と $\alpha > 0$ 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，出発リンクと退却リンクはコスト 0 とする．前記の文献ではこれよりも少し複雑なコスト関数を用いている．

上述のコスト関数はリンクごとに独立していて流れの単調増加関数であるので，先に述べた利用者均衡配分の条件と，次の凸関数の最小化問題 (P) の Karush-Kuhn-Tucker 条件が等価となり，利用者均衡配分を求めることは (P) を解くことに帰着される [4]．

$$(P) \quad \min_u F(u) = \sum_a \int_0^{u_a} \phi_a(v) dv, \text{ ただし } u_a = \sum_{r(t)} u_a^{r(t)}$$

制約条件

$$Du = f,$$

$$u \geq 0.$$

この問題は Appendix に示すように Frank-Wolfe 法を改良した手法によって比較的効率よく数値解が得られることが知られている [2]．

4. 利用者均衡配分計算の合理性

最初に，大都市交通センサスの回答を再現した乗客の流れ（センサス配分）と利用者均衡配分問題の解（均衡配分）を比較して，利用者均衡配分問題の解が現実の乗客の流れとどの程度一致しているかをみる．後述図 22 の左側の図がセンサス配分によるネットワーク上の乗客分布を時間帯別に表したものである．

走行リンクのコスト関数のパラメータの値は文献 [5] を参考にし、実際に配分問題を解いた結果をみて、時間によって混雑度の重みを切り替えるように次のように定めた。

$$7:30 \text{ まで} \quad \phi_a(u_a) = t_a \left(1 + 0.02 \left(\frac{u_a}{c_a} \right)^{4.5} \right) \quad (4.1)$$

$$7:30 \text{ 以降} \quad \phi_a(u_a) = t_a \left(1 + 0.1 \left(\frac{u_a}{c_a} \right)^{4.5} \right) \quad (4.2)$$

まず、全体として一致しているかどうかの傾向をみるために次の二つの指標を用いる。

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。それと同様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を求める。

OD 間平均旅行時間

ソース（出発時間帯を区別した出発駅）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。

4.1. 周辺分布の比較

図 8 にセンサス配分と均衡配分について、横軸に OD 間平均旅行時間を取り、乗客数を旅行時間 1 分刻みにまとめた分布を示して比較する。両者はよく一致していることが分かる。もともと、時刻表による旅行時間が決まっており、短時間の旅行では同じ路線であれば電車が異なっても旅行時間は大きく変化しないので、この両者はよく一致する傾向にある。

図 9 にセンサス配分と均衡配分の駅間乗車率の比較を示す。横軸に駅間乗車率を取り、乗客数を乗車率 5% 刻みでまとめた分布である。普通電車と優等電車に分けて示してある。普通電車よりも優等電車の乗車率がかなり高いこと、センサス配分の優等電車の乗車率のばらつきが大きいことがわかる。また、旅行時間ほどではないが、両者は比較的よく一致していることがわかる。

以上の比較は周辺分布の比較である。これに対して、各 OD 間移動について、均衡配分の値とセンサス配分の値とを直接比較する。図 10 は一方の軸にセンサス配分の旅行時間、他方の軸に均衡配分の旅行時間を取り、対応する OD 間移動人数を濃淡で表示した図である。二つのモデルから得られる乗客の配分がよく一致していれば 45 度の線の上に濃い帯が現れる。先の周辺分布から予想されるように、それらはよく一致している。同様に、駅間乗車率の比較を、図 11 に普通電車について、図 12 に優等電車について示す。旅行時間に関する比較に比べると一致の程度は高くないが、45 度の線に沿って濃い帯が現れている。図 13 にソースとシンク間の経路での乗換回数（利用電車数）の比較を示す。整数でない値があるのは複数の経路について平均をとるためである。両者はよく一致して同じ整数値の組み合わせに集中するので、濃淡は対数スケールとなっている。

4.2. 路線ごとの比較

センサス配分と均衡配分の比較をもう少し詳しくみるために、ネットワーク全体の計算結果からいくつかの路線を取り出して比較する。

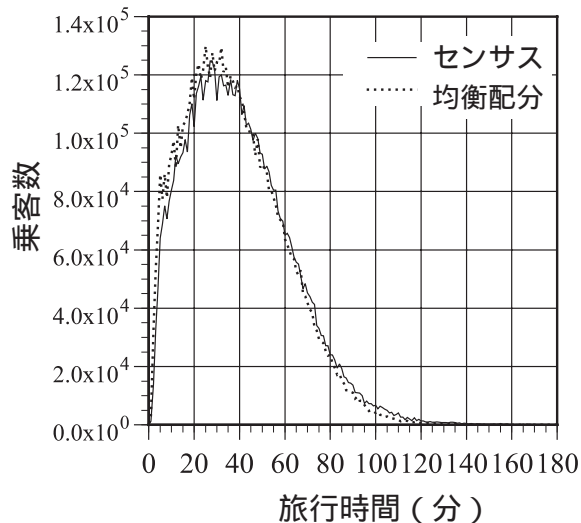


図 8: 均衡配分とセンサス配分の比較 (旅行時間分布)

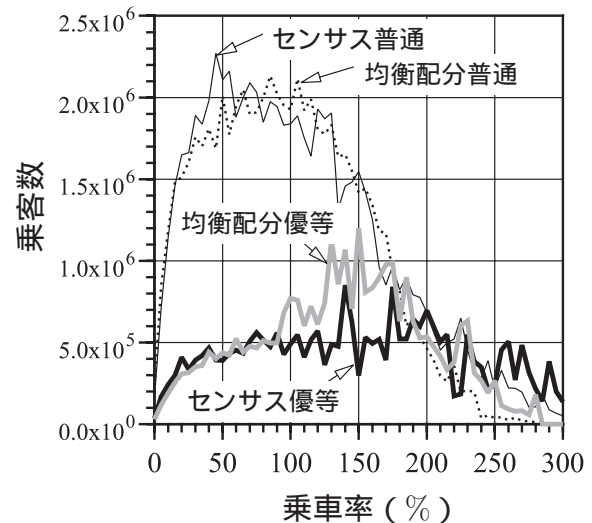


図 9: 均衡配分とセンサス配分の比較 (駅間乗車率)

東急田園都市線の普通電車と急行電車

最初は東急田園都市線を取り上げ、急行電車への乗客の集中に注目する。この路線は神奈川県の外と東京都心をつ結び、路線の終点である渋谷からさらに地下鉄に乗り入れている、都心部を通過する数多くの路線に乗り換えることができる利用者の多い路線である。中央林間で小田急江ノ島線、長津田で JR 横浜線、溝の口で JR 南武線、二子玉川で東急大井町線、三軒茶屋で東急世田谷線へそれぞれ乗り換えができる。電車種別は急行と普通の 2 種類しかなく、通勤時間帯には江田、梶が谷、桜新町で停車中の普通電車を急行電車が停車せずに追い越す。また、二子玉川で普通電車を降りて後続の急行電車を待って乗り換える利用者が多い。図 14 にセンサス配分、図 15 に均衡配分について、横軸に路線、縦軸に駅間を移動する乗客を 20 分ごとにまとめた人数を急行電車と普通電車とに分けて示す。センサス配分と均衡配分を比較すると、ラッシュ時前後の乗客数の変化、普通電車と急行電車への乗客の分散の様子がよく合っていることが分かる

東海道線、横須賀線、京浜東北線

次に複数の路線間での乗客の配分を比較してみよう。神奈川から東京へ向かって東海道線、横須賀線、京浜東北線の 3 つの路線が JR によって運行されており、多くの利用者がある。東海道線、横須賀線は駅間隔が長く遠い距離を早く移動することが出来る。京浜東北線は駅間隔が短く快速電車に対する各駅停車の位置づけにある。図 16, 17, 18 にそれぞれの路線の乗客数をセンサス配分と均衡配分で比較したグラフを示す。路線が競合する大船・東京間ではやや当てはまりが悪いが、路線に沿った乗客数の変化とラッシュ時前後の乗客数の変化は 3 路線ともセンサス配分と均衡配分とがよく似た傾向を示している。これに対して、より正確な時刻表を用いて路線ごとにパラメータの値を調整してさらにより結果を得ることができる。しかし、ここまで示した二つの配分の比較によって、第一ステップとして均衡配分が十分よくセンサス配分を近似できていると考え、5 章の応用例に進むこととする。

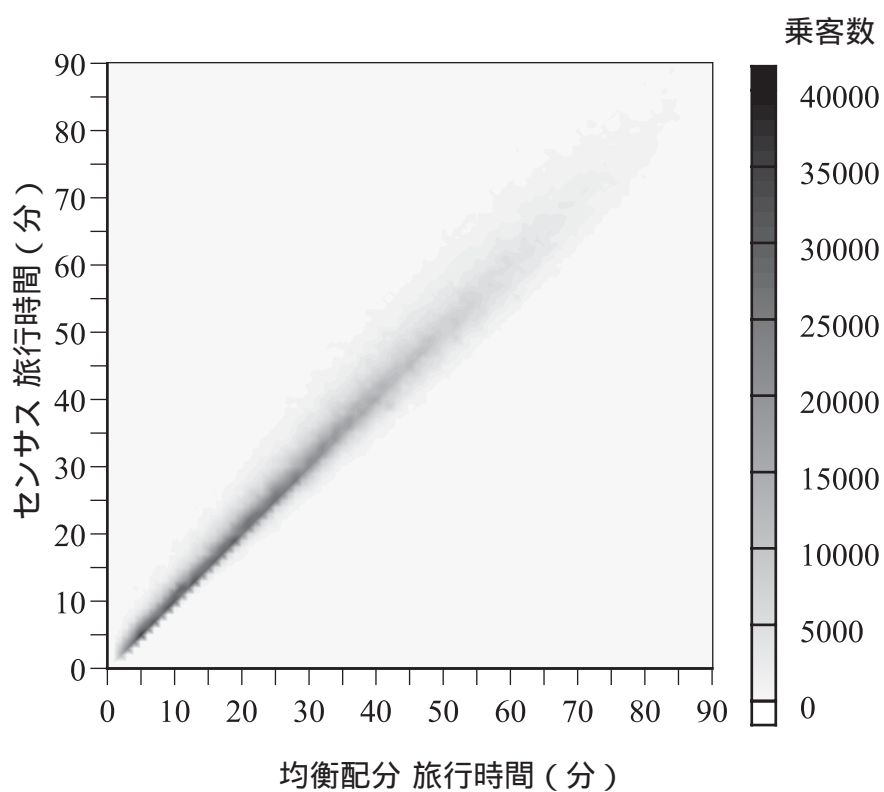


図 10: 同一の OD に対するセンサス配分と均衡配分の OD 間平均旅行時間の比較

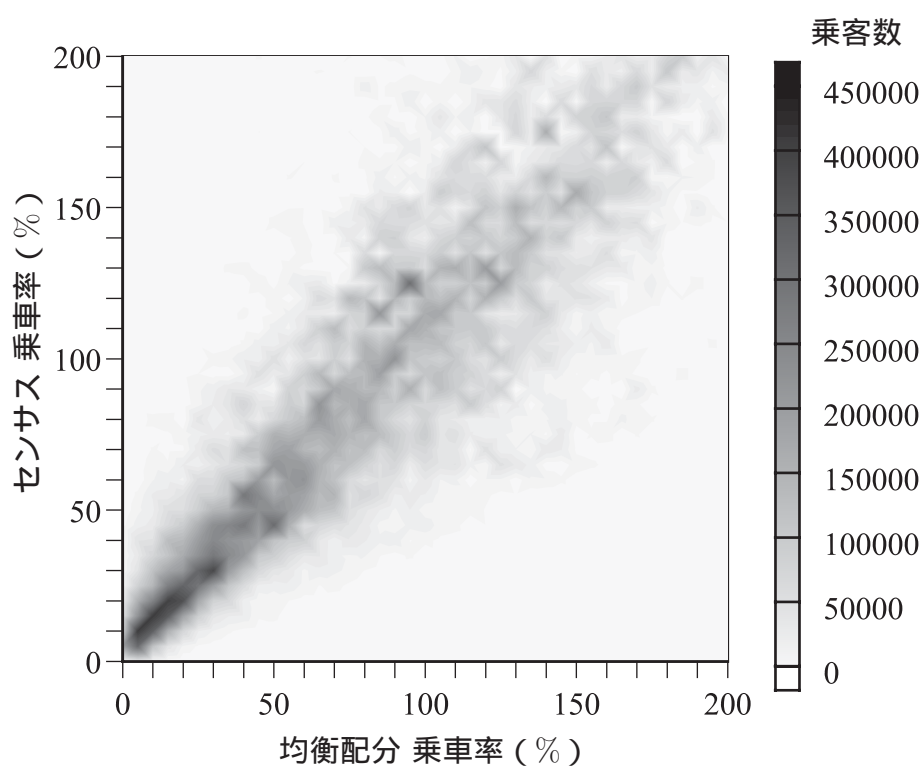


図 11: 普通電車駅間乗車率のセンサス配分と均衡配分の比較

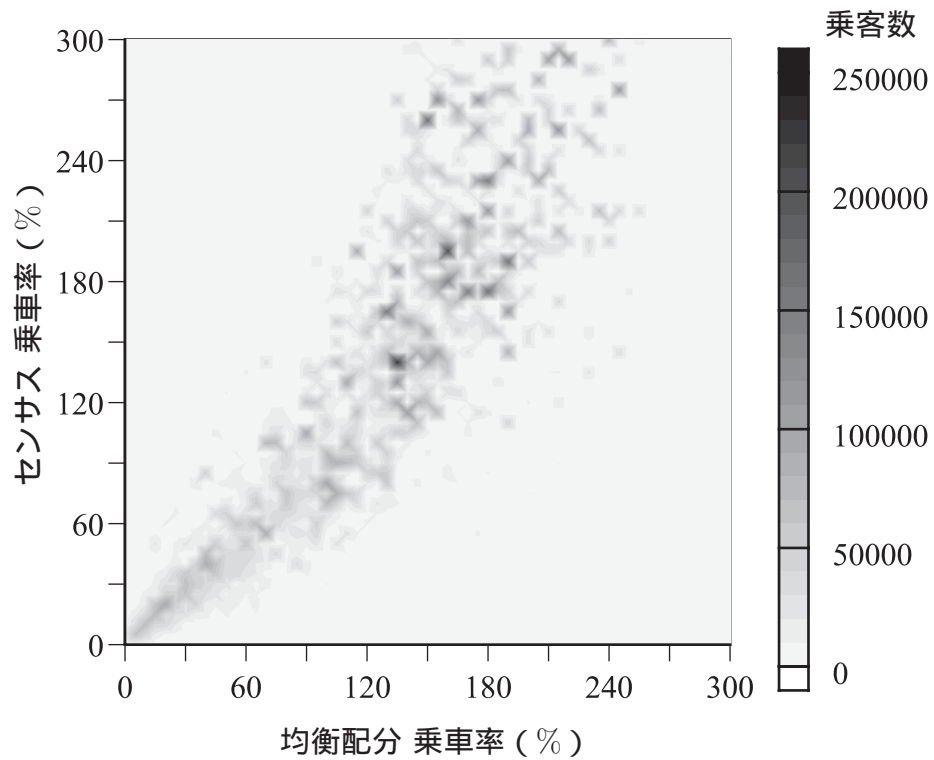


図 12: 優等電車駅間乗車率のセンサス配分と均衡配分の比較

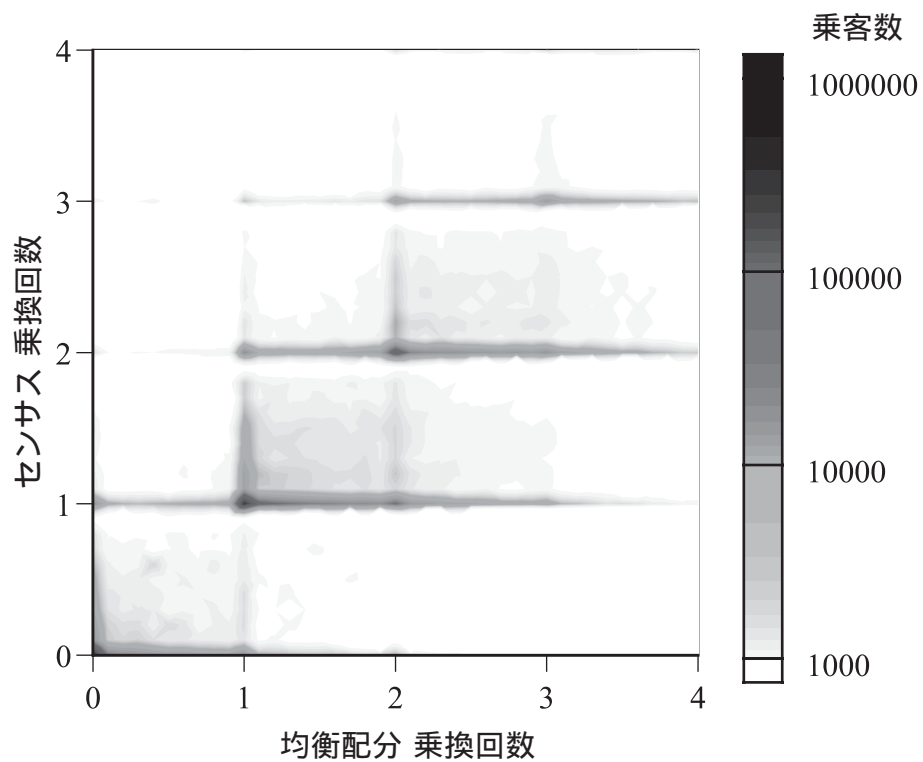
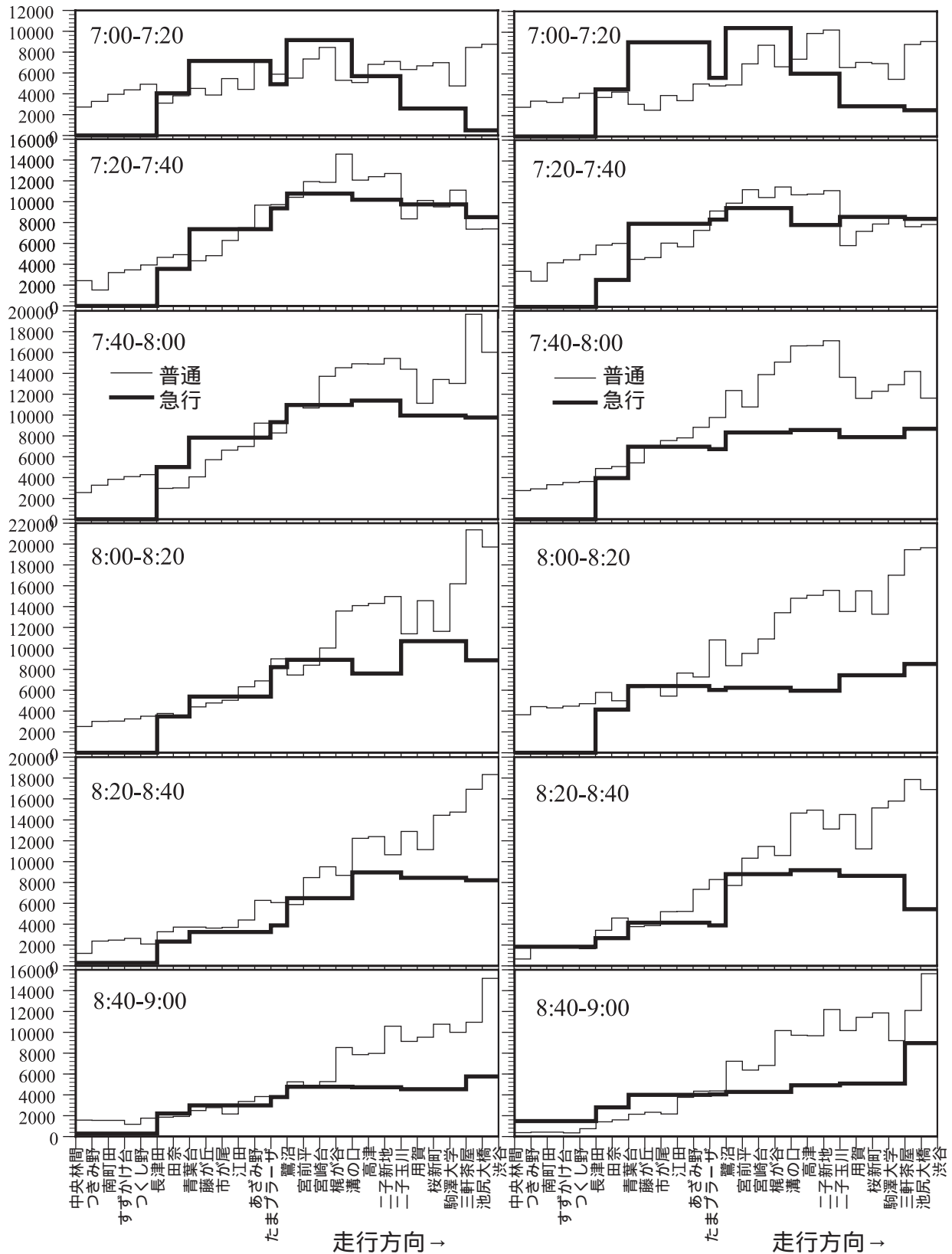


図 13: 同一の OD に対するセンサス配分と均衡配分の平均乗換回数の比較

乗客数

図 14: センサ配分による急行、普通
電車乗客数分布 (東急田園都市線)図 15: 均衡配分による急行、普通電車
乗客数分布 (東急田園都市線)

乗客数

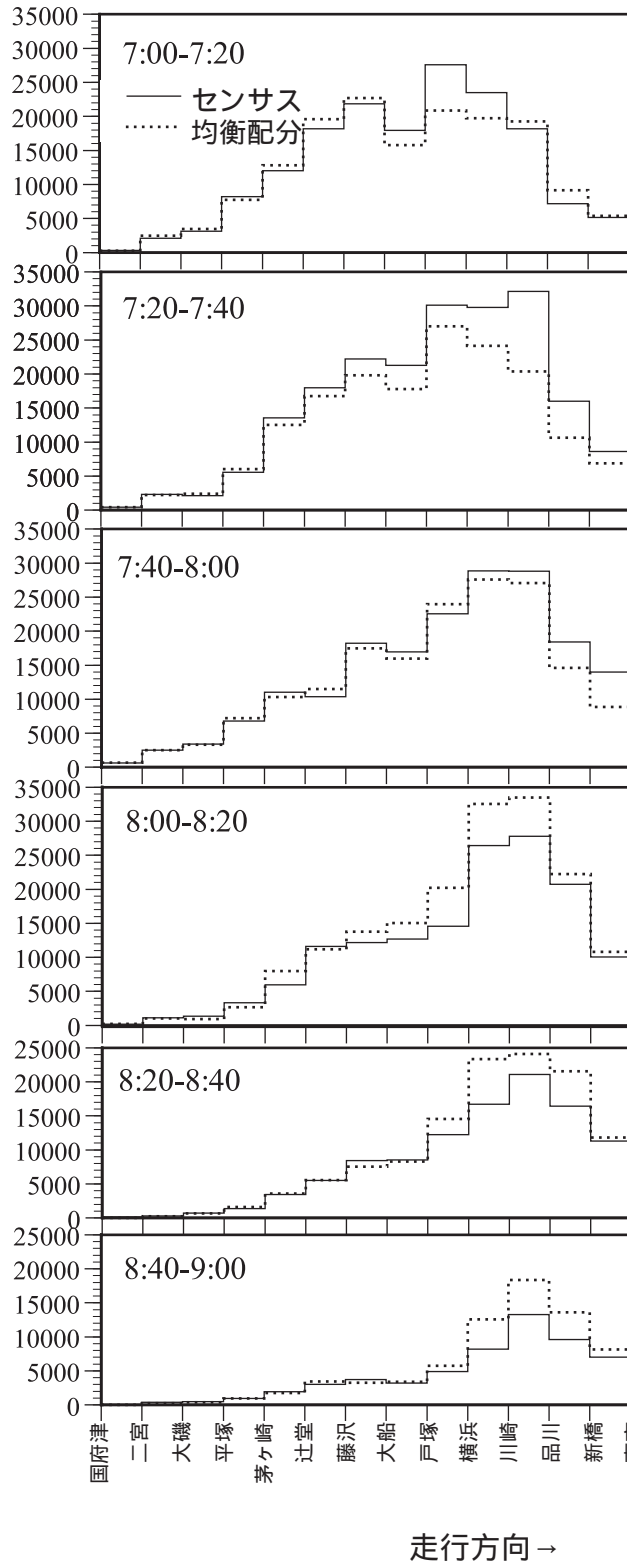


図 16: 東海道線の乗客数 (均衡配分とセンサス配分の比較)

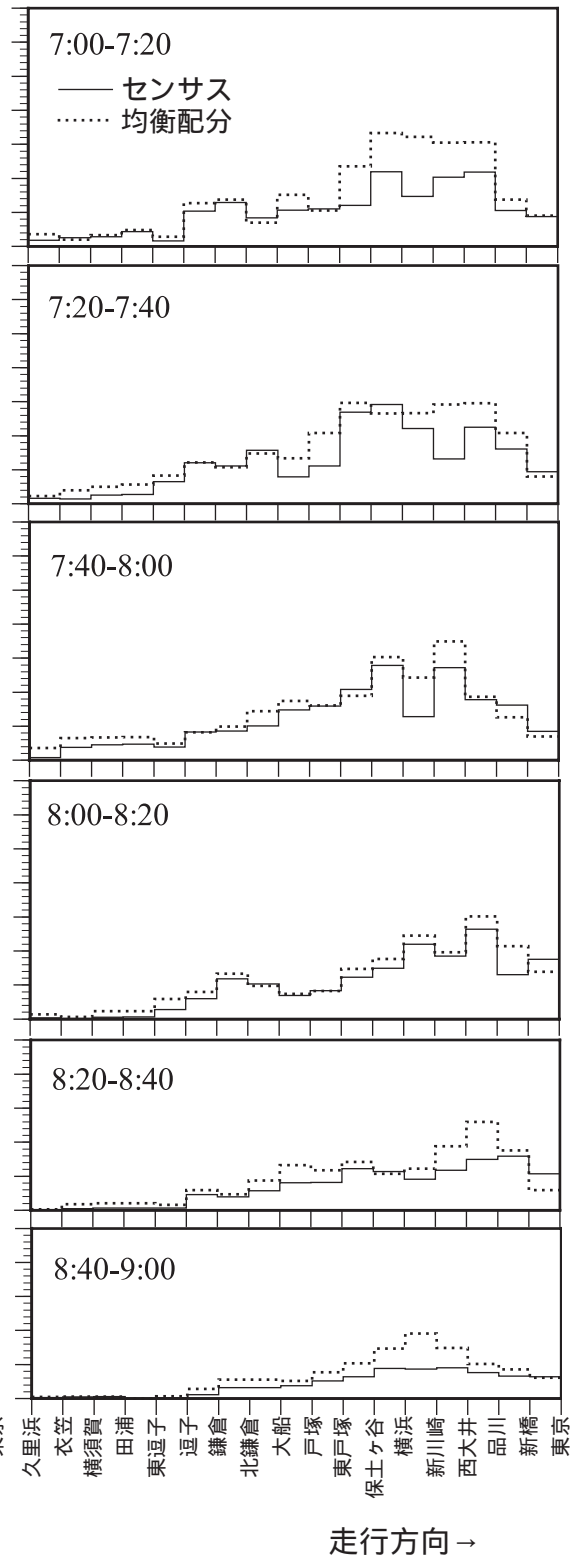


図 17: 横須賀線の乗客数 (均衡配分とセンサス配分の比較)

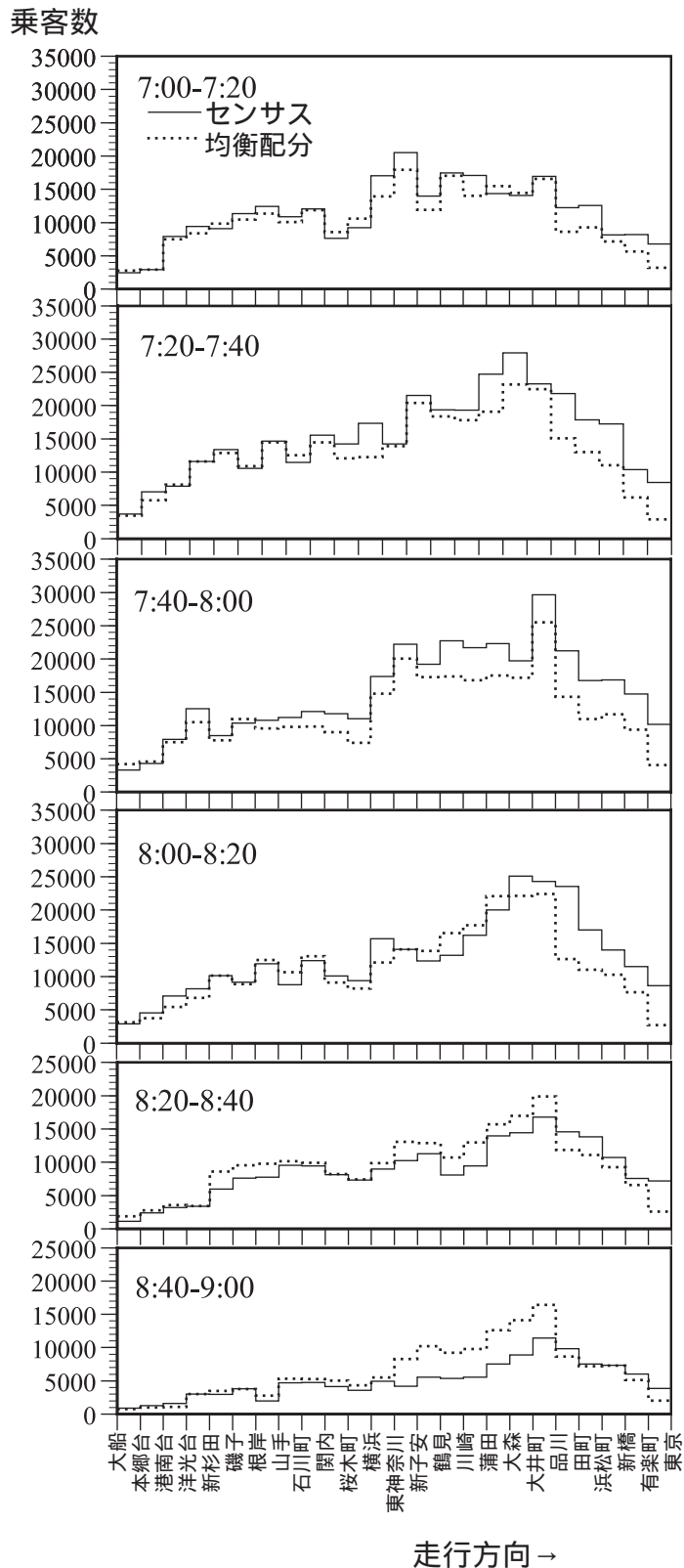


図 18: 京浜東北線の乗客数（均衡配分とセンサス配分の比較）

5. 応用例

利用者均衡配分モデルを応用した計算例をふたつ述べる．ひとつは利用者のコスト関数を変更して混雑を緩和するように OD 交通需要を時間的に変化させて，その効果を検討することである．もうひとつは南北線全面開通にともなう利用乗客数の変化を開通前の OD 交通需要を用いて計算して，供給側の変化の影響を予測することである．

5.1. 時差出勤

通勤ラッシュ時の混雑解消の手段として時差出勤がいられている．もし路線が 1 本で就業地が少数ならば混雑緩和の効果を予測することは難しくない．しかし，東京首都圏のように広範囲に広がる複雑なネットワーク上で長時間にわたって利用者が現れる場合には，どの程度効果が上がるのかを予測するのは難しい．また，効果が上がるとして，そのために利用者はどのように出発時間を調整すれば良いのであろうか．この問題を次のような利用者均衡配分問題として考えよう．リンク a の流量を u_a ，通過時間を t_a ，容量を c_a ，コスト関数を ϕ_a として， ϕ_a の乗車率に関する重みを大きくして，

$$\phi_a(u_a) = t_a \left(1 + 4 \left(\frac{u_a}{c_a} \right)^2 \right) \quad (5.1)$$

とし，出発時刻を調整するために，各ソースからネットワークへ入る出発リンク（コスト 0）を，ソースの出発時刻に合わせた電車だけでなく，早い方に 1 時間，遅い方に 2 時間範囲を広げ，その間に出発する電車に乗れるように接続する．これは時間帯で分かれているソースを上記の範囲でひとつにまとめたことに相当する．

図 19 に OD 間平均旅行時間，図 20 に駅間乗車率をセンサス配分と時差出勤均衡配分（以下時差出勤）とを比較して示す．時差出勤による経路の変更は，出発リンクのコストを 0 としたおかげで経路の途中ではなく主に出発駅からの出発電車の変更によっている．したがって旅行時間はほとんど変化しない．しかし，乗車率は普通電車と優等電車ともに高い区間が大きく減り，平均化されていることがよくわかる．図 21 に全利用者の出発時刻の分布と到着時刻の分布の比較を示す．出発時刻は約 15 分，到着時刻は約 30 分遅い方にシフトしている．図 22 にネットワーク上の乗客分布の時間変化を示す．図は各路線の駅間の乗客数を 20 分ごとにまとめて，路線上に立てた壁の高さと濃淡で表してある．センサスでは 7:40～8:40 のラッシュ時に乗客が都心に集中しているのに対して，時差出勤ではその前後に乗客が分散し，ピーク時の混雑が緩和されていることがわかる．

時間軸に沿った乗客の分散をもう少し詳しくみてみよう．図 23 に，出発時刻を 20 分ごとに区切り，その時間帯に出発した利用者がいつまでネットワーク上に残っているかを表す滞在時間分布を示す．また，[東京駅と新宿駅の中間]を中心として，半径 1km ごとの同心円で路線網を区切り，各円環に含まれる区間の乗客移動量（人・分）を 20 分単位に集計し，中心からの距離を横軸として表したグラフを図 24 に示す．図 22 のグラフを円環領域で積分したことにほぼ相当する．

図 23 をみると，時差出勤は 5 時台に利用者を出発させ，6 時台に出発する利用者の総量を減らすとともに遠距離利用を避けさせている．そして，8 時台の後半から出発する利用者を増やしていることがわかる．また，図 24 をみると中心から 3km 付近に大きな山があり，20～30km に小さな山がいくつかある．センサス配分では 7:40～8:40 の間に利用者が集中している．そしてラッシュのピーク時の前は中心から離れたところの交通量が相対的に多く，ピーク時以降は中心から離れたところから先に交通量が減少していく．言い換えると，通勤

客の高い波が郊外から都心へと移動している。一方、時差出勤では、ほとんどの時間帯についてカーブの形が相似であり、7:20～9:00の間は量もほぼ等しくなっていて、時間軸に沿って交通量が平準化するように出発時刻が巧妙に調整されていることがわかる。より詳しく見ると出発駅に応じて出発時間の調整がなされていることが分かるが、これは稿を改めて議論したい。また、この計算にはすべての普通券利用者と6:00以前と9:30以降に出発する定期券利用者が含まれていない(図1参照)。これは混雑解消という点で現実の利用状況と比較して時差出勤モデルに有利になっていることに注意する必要がある。

5.2. 南北線利用者予測

南北線は2000年9月26日に全面開通した新しい路線であり、東京北部にある赤羽岩淵と南西部にある目黒を文字通り南北に結んでいる。途中の後楽園から溜池山王まで各駅で多くの路線と乗り換えることができる。2000年に行われた大都市交通センサスの調査期間(10/23-27)は開通後なので利用者が記録されている。しかし、1995年調査時には部分的な開通のため利用者は非常に少ない。本文のモデルが予測モデルとして使えるかどうかをみるために、2000年の乗換ネットワークに1995年のセンサスデータをOD交通需要として入力して均衡配分計算を行い、2000年の実際の利用データ(センサス配分)と比較してみよう。図25に目黒方向に向かう路線に沿った駅間の乗客数を示す。路線に沿った乗客数分布とラッシュ時前後の乗客数の変化の様子はよく合っているが、実際の利用者(センサス配分)が予測(1995データ均衡配分)よりも少ない。この傾向は2000年のOD交通需要を用いた均衡配分でもまったく同様である。このことは調査日と全線開通の日が近いので南北線がよく認知されていないことと、定期券利用者の経路変更がなされていないことに理由があると考ええる。

6. あとがき

本論文では、東京首都圏において電車を利用する通勤・通学客の電車ネットワーク上の移動を計算する問題を利用者均衡配分問題として定式化した。そして、朝の定期券利用者のうち約700万人に対して、自宅最寄り駅から最終目的駅への時間依存の交通需要データを、JR線私鉄線合計128路線のほぼ時刻表通りに運行される電車に配分するモデルを導いた。その計算結果と大都市交通センサスに記録された実際の乗客の移動と比較してモデルの妥当性を確かめた。その上で、応用問題として時差出勤による混雑緩和の可能性を調べることで、南北線全線開通にともなう乗客数を予測し実際の利用者数と比較することを行った。

ここで提案した手法によって、首都圏のような広い範囲の公共交通機関を利用する移動に対して詳細な検討を行うことができるひとつのツールが得られたと考えている。今後は、ここで論じた問題の他に、移動しやすさからみた地域の評価、通過する乗客の量や属性からみた駅施設の集客力の評価など具体的な応用問題への適用を進め、それにともなってデータを整備するとともに、モデルを拡充したいと考えている。また、配分を定めるコスト関数のパラメータを推定すること、さらには、路線、時間帯、乗客の属性などによって異なる値として、より実証的なモデルとすることが考えられる。これに対しては、センサスデータよりも正確な乗車人数データが必要であると考えられるので、今後の課題としたい。

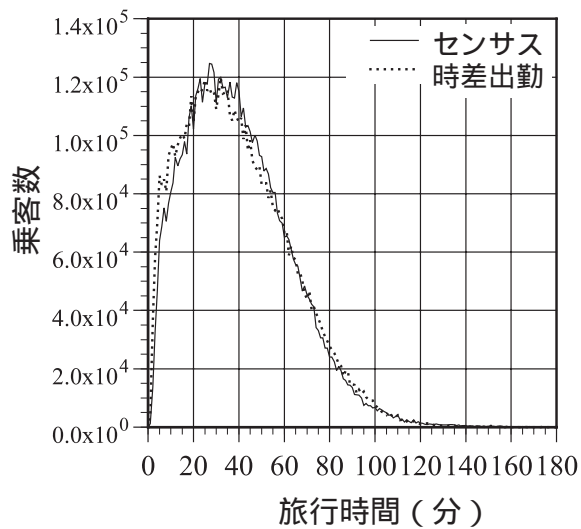


図 19: 時差出勤の効果 (OD 間旅行時間)

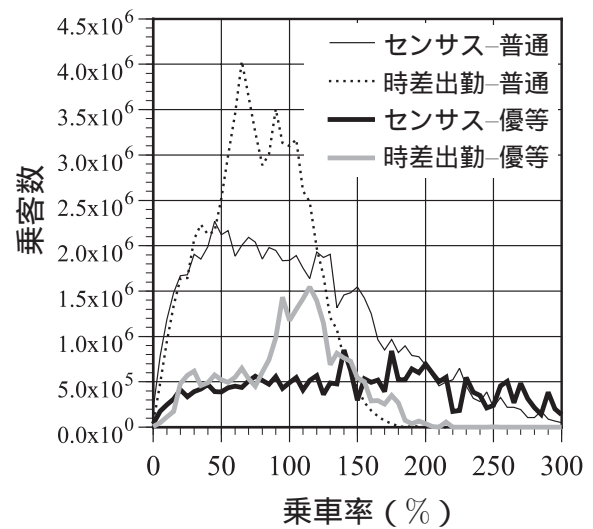


図 20: 時差出勤の効果 (駅間乗車率)

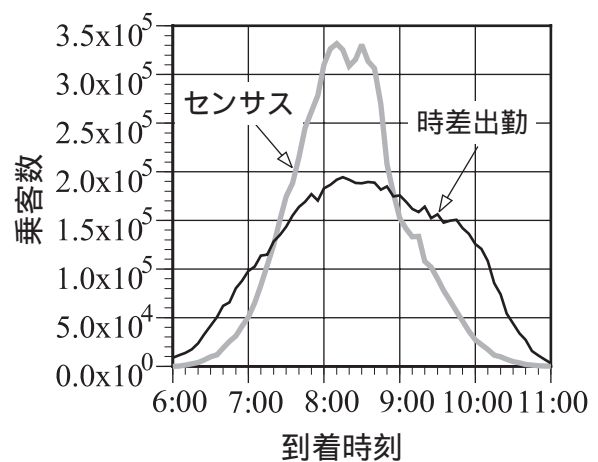
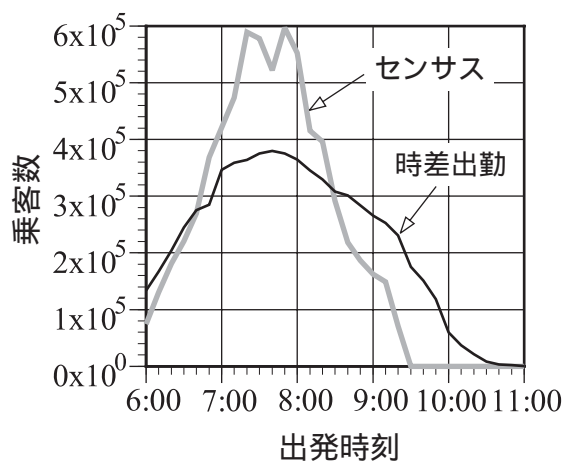


図 21: 時差出勤とセンサスデータの比較 (出発時刻と到着時刻)

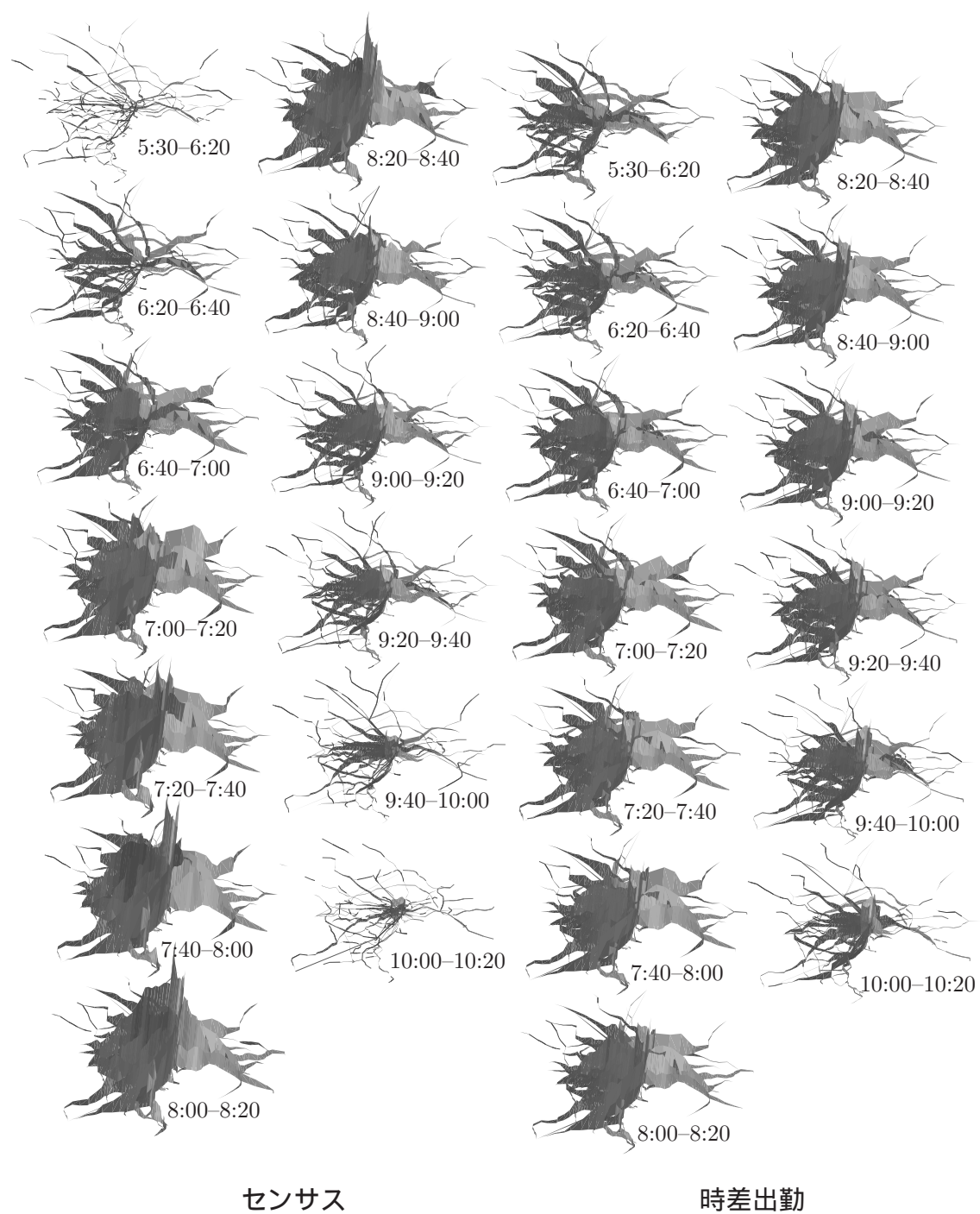


図 22: ネットワーク上の乗客分布の時間変化 (センサスと時差出勤の比較)

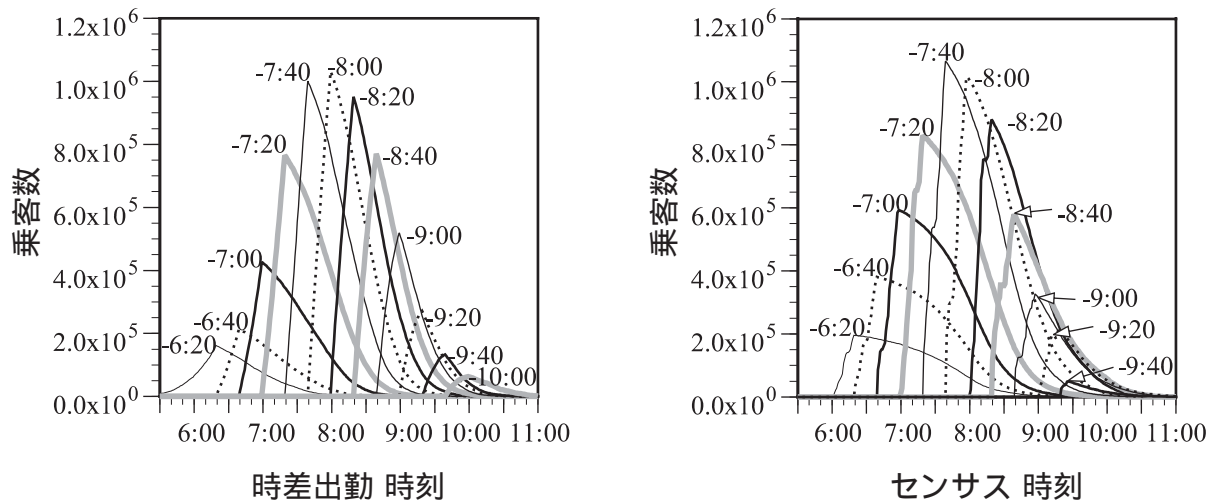


図 23: 出発時間別の乗客滞在時間分布

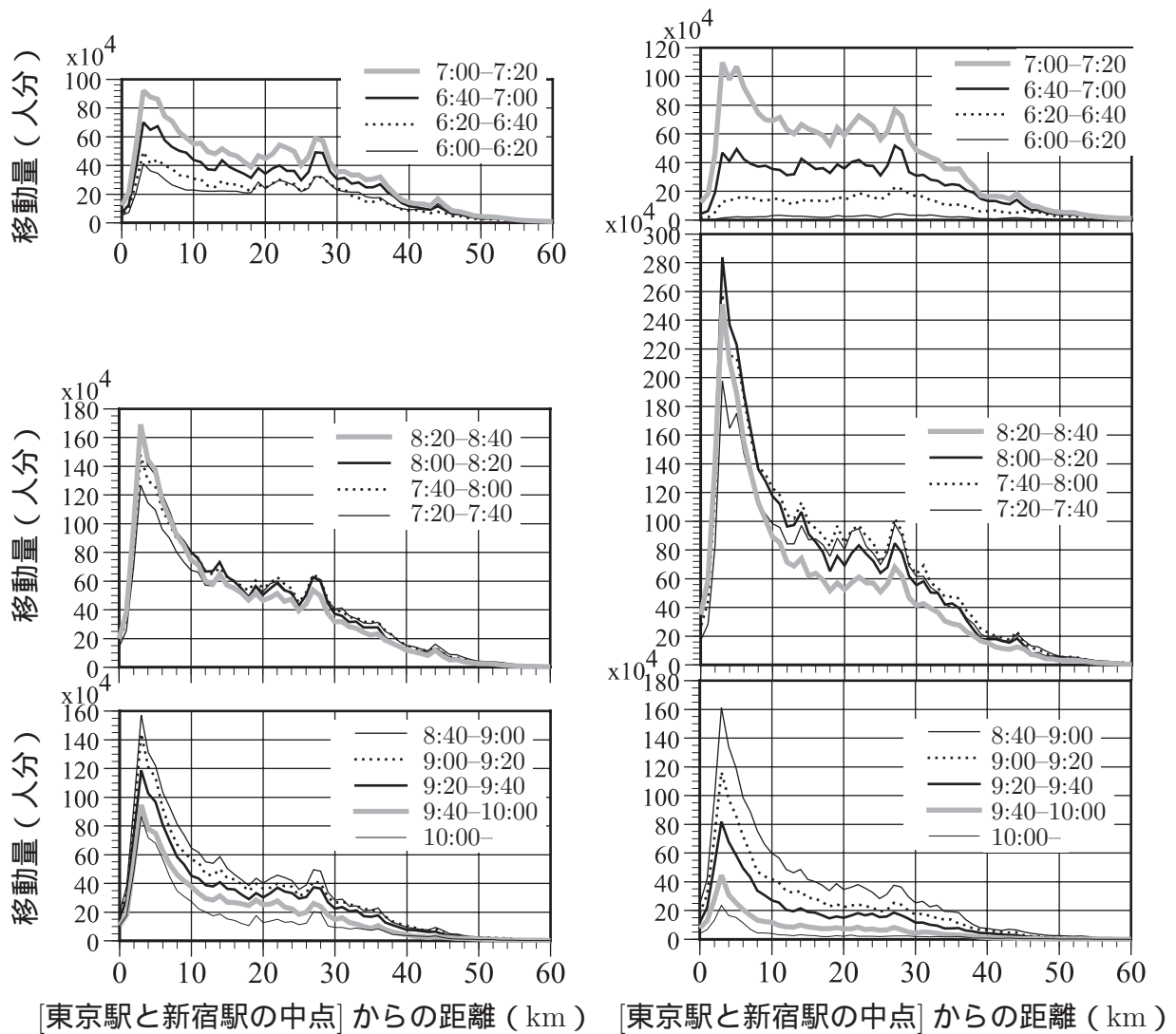


図 24: 時差出勤の効果 (時差出勤 (左図) とセンサス (右図) の時間帯別乗客分布)

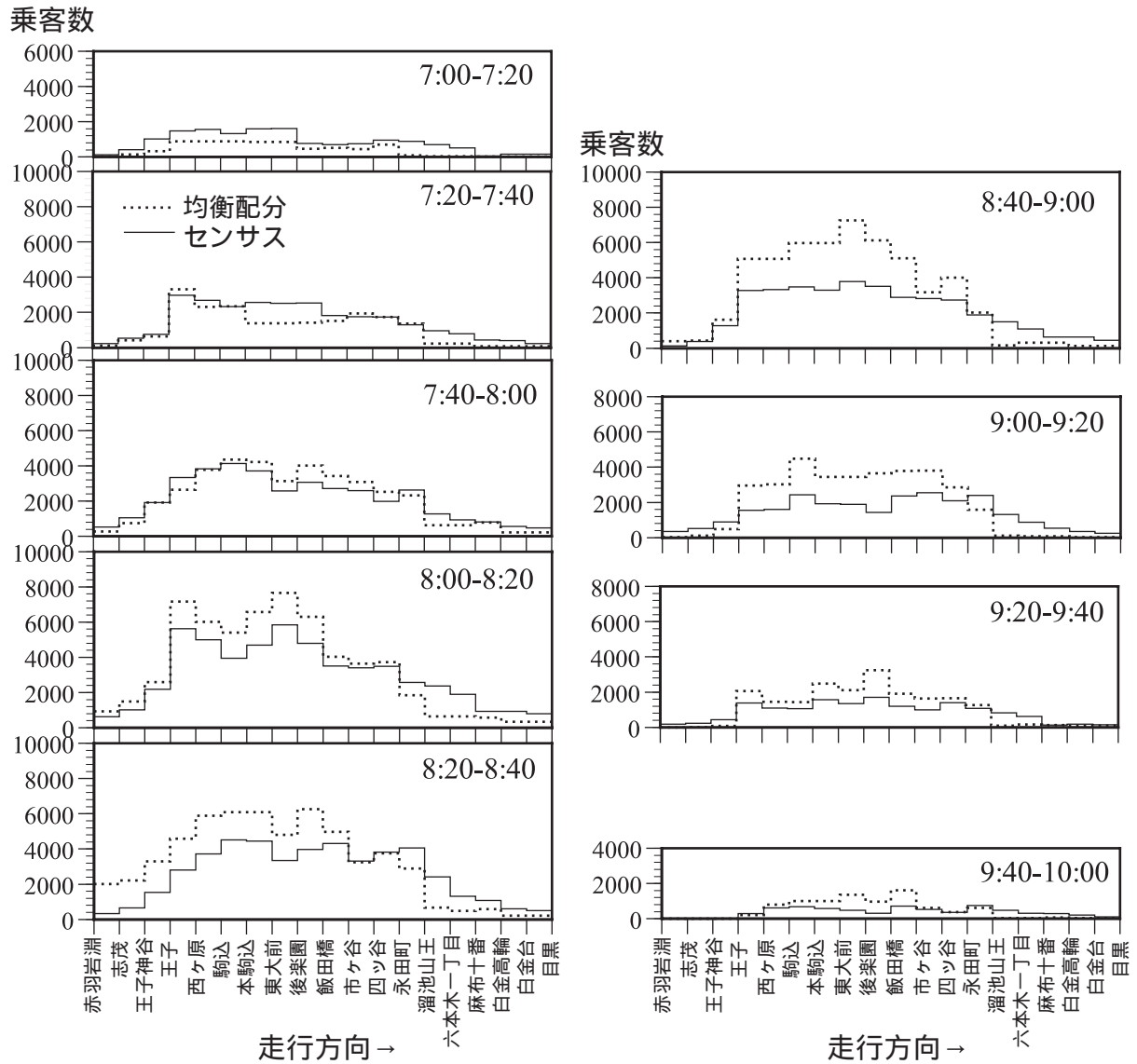


図 25: 南北線の交通需要予測 (1995 年 OD データと 2000 年ネットワークを用いた利用者均衡配分計算の結果)

付録

ここで述べる解法は文献 [2] による．問題 (P) の解を繰り返し計算によって近似解を求める． u_k を問題 (P) の制約条件を満足する k 回目の繰り返しにおける近似解とする．探索方向 $y - u_k$ を求めるために，目的関数 F を u_k において 2 次近似すると，

$$F(u_k + y - u_k) \approx F(u_k) + \nabla F(u_k)(y - u_k) + \frac{1}{2}(y - u_k)^t \nabla^2 F(u_k)(y - u_k)$$

を得る．上式右辺を目的関数として， y を求める 2 次計画問題を次のように表す．

$$\begin{aligned} (\mathbf{P}_y) \quad & \min_y G(y) = \nabla F(u_k)(y - u_k) + \frac{1}{2}(y - u_k)^t \nabla^2 F(u_k)(y - u_k) \\ & \text{制約条件} \\ & Dy = f, \\ & y \geq 0. \end{aligned}$$

再び問題 ($\mathbf{P}_y$) の解を繰り返し計算によって求める． y_i を問題 ($\mathbf{P}_y$) の制約条件を満足する i 回目の繰り返しにおける近似解とする． y_i における目的関数の勾配 G は次のように与えられる．

$$\nabla G(y_i) = \nabla F(u_k) + (y_i - u_k)^t \nabla^2 F(u_k)$$

そこで，探索方向 $x - y_i$ を求めるのに，次の線形ネットワークフロー問題を解く．

$$\begin{aligned} (\mathbf{P}_x) \quad & \min_x \nabla G(y_i)x = \sum_a \{\phi_a(u_{a,k}) + (y(a, i) - u_{a,k})\phi'_a(u_{a,k})\}x_a \\ & \text{制約条件} \\ & Dx = f, \\ & x \geq 0. \end{aligned}$$

ここで $u_{a,k}$ ， $y_{a,i}$ ， x_a はそれぞれ u_k ， y_i ， x の枝 a を通る流れの合計である．この問題は，枝 a の長さが $\phi_a(u_{a,k}) + (y(a, i) - u_{a,k})\phi'_a(u_{a,k})$ であるとして，各ソース $r(t)$ を始点としてすべてのシンク s までの最短経路問題を解き，その経路にそって流量 $e_s^{r(t)}$ を割り当てることによって解を得ることができる．この繰り返しを $i = \min(4, k/3 + 1)$ まで行って，得られた解を $\mathbf{P}_y$ の近似解，すなわち，外側のループの探索方向とする．

謝辞

本研究は，文部科学省科学研究費「都市内都市間交通網と公共施設配置に関する数理的ならびに実証的研究」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] 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.
- [2] 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).
- [3] S. Pallottino and M.G. Scutella: Shortest path algorithms in transportation models: classical and innovative aspects. In P. Marcotte and S. Nguyen (eds.): *Equilibrium and Advanced Transportation Modelling* (Kluwer Academic Publishers, 1998), 246–281.
- [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: 首都圏電車ネットワーク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 年度秋期研究発表会アブストラクト集, 30–31.
- [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配分問題. 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2003 年度秋期研究発表会アブストラクト集, 32–33.
- [8] 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).
- [9] MATT 関東圏 JR 線私鉄線時刻表 (八峰出版株式会社, 2002).

田口 東

中央大学理工学部情報工学科

〒 112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

E-mail: taguchi@ise.chuo-u.ac.jp

ABSTRACT

TIME DEPENDENT TRAFFIC ASSIGNMENT MODEL FOR COMMUTER
TRAFFIC IN TOKYO METROPOLITAN RAILWAY NETWORK

Azuma Taguchi
Chuo University

In this paper we propose a traffic assignment model based on user equilibrium principle for commuters traveling through the public railway network in Tokyo Metropolitan area. Our model covers about seven million commuters in seventy five hundred trains traveling along 128 railway routes of JR and other private railway companies. Since such census data of commuter traffic that describes for each commuter his/her origin station, departure time and destination station are available, we formulate this problem as being time dependent. In order to treat the time dependent problem where OD traffic demand depends on time and commuters are assigned to each train running according to a timetable, we adopt such approach to construct a time-space network which honestly expresses the timetable of trains in the network. We extend a usual network to a time-space network by representing each train arrival/departure at a station by a node, each train travel between successive stations by an edge. Using this kind of network, the time dependent problem could be formulated as to find static equilibrium flow pattern being realized through “user-optimal” route choice of commuters, i.e. Wardrop’s first principle.

In order to obtain OD traffic demand as an input to the traffic assignment problem, we edit the census data for commuter traffic in Tokyo area in 2000. The calculated results show good coincidence with the commuters’ flow pattern reproduced by aggregating commuters on every train according to records in the census data. After this preliminary calculation, we considered two applications to demonstrate usefulness of our model. One is to forecast how many commuters would change their routes to use newly opened railway line “Nanboku-sen”. The other is to estimate the effect of staggered departure of commuters to their offices in order to reduce congestion during the morning rush hours. We believe that we could propose a useful tool to analyze precisely commuter traffic flow in a widespread public transportation network.