

路線バスの遅延を考慮した旅行時間と 旅行経路の信頼性の評価

鳥海 重喜, 水本剛四郎, 田口 東

路線バスは、近年の自動車交通の増加に伴い、交通渋滞、交通事故などの影響を受けて、時刻表通りの運行が難しくなっている。そのため、路線バス利用者は遅延を考慮し、時間に余裕を持って路線バスを利用せざるをえなく、利便性が損なわれている。本稿では、路線バスの遅延が利用者の旅行時間にどのような影響を与えているかということ、空間的な移動と時間の進行を表現する時空間ネットワークを用いて分析する方法を紹介する。

キーワード：路線バス、遅延、旅行時間、時空間ネットワーク

1. はじめに

国土交通省の交通関連統計資料集によれば、全国の実路線バス（以下、バス）の利用者は、昭和45年の約100億人をピークに減少し続け、平成17年度は約42億人とピーク時の半分以下になっている。その一因として、郊外部では自家用車の普及、都市部では鉄道路線の開通による利用手段の転換などが考えられる。

公共交通手段であるバスは、運行ルートとスケジュール（時刻表）が定められており、自家用車に比べて移動の自由度が低く、利便性の面では自家用車に劣ることは否めない。鉄道も同様に運行ルートとスケジュールが定められているが、鉄道は定時性運行がほぼ保たれているのに対し、バスはそれが難しいため、鉄道よりもさらに利便性が低いといえよう。一部の道路では、他の自動車交通の影響を受けないようバス専用レーンが設けられているものの、多くの道路では共用しており、道路混雑の悪化の影響を大きく受けている。

道路混雑による所要時間の増分を見込んでスケジュールに組み込めば、遅延を避けることはできる。しかし、見込みすぎると停留所に到着し、出発時刻まで停車しなければならない。そこで、運行事業者は正確な所要時間を見積もる必要があるが、時々刻々と変化する道路事情を考慮すれば、それは困難である。現状で

は、過去の運行実績などに基づく所要時間の期待値をベースとしてスケジュールを立てており、ある程度の遅延を許容している。そのため、バス利用者は時間に余裕を持った経路を選択する必要があり、利便性が損なわれていると感じている。

さて、都市部のように頻繁にバスが運行されていれば（バスが到着すれば）、遅延がそのまま旅行時間の増加となるわけではない。遅れてきた一本前のバスに乗って、ほぼ予定通りに到着することもあり得る。

このように、遅延は必ずしも旅行時間を増加させるわけではなく、定時性運行が保たれている鉄道と組み合わせる場合、どのような影響があるのかを知ることが大変興味深い。本稿では、現状の運行スケジュールと運行実績とを比較することで遅延特性を分析するとともに、バスの遅延が及ぼす影響を時空間ネットワークを用いて分析する。

2. 遅延特性分析

2.1 バスロケーションシステム

バス利用者にとって不確実なことは、バスに乗車してから目的地までの所要時間と停留所での待ち時間である。そこで、運行事業者は、ほぼリアルタイムにバスの運行状況（バスの現在地）がわかるバスロケーションシステムを開発し、インターネットや携帯電話を通じて、バス利用者へ提供している。例えば、東京都交通局では、運行系統ごとに、どの停留所間をバスが走行しているのかということを実タイムに更新しながら、インターネット上のホームページで公開している（図1）。

バスロケーションシステムによって、乗車する停留

とりうみ しげき, たぐち あずま
中央大学 理工学部
〒112-8551 文京区春日 1-13-27
みずもと ごうしろう
帝京八王子中学校・高等学校
〒192-0151 八王子市上川町 3766



図1 東京都交通局のバスロケーションシステム

所の到着（出発）時刻が予測できれば、停留所での待ち時間を削減できる場合がある。また、頻繁に運行されている路線では、先行バスの遅延時間を調べることで、乗車予定バスのおおよその所要時間を予測することも可能である。

2.2 運行実績ダイヤグラムの作成

東京都交通局のバスロケーションシステムから得られるバスの位置情報（以下、都営バスデータ）を1分おきに取得し、運行実績ダイヤグラムを作成する。データの取得期間は、2005年5月9日（月）～5月13日（金）の5日間とし、対象路線は東京23区内を運行する8路線（102停留所）とする（表1）。対象とする8路線を合計して、1日669本のバスが運行されている。

都営バスデータから得られるのは、ある時点において、バスがどの停留所間を走っているのかということであり、停留所の到着時刻や出発時刻、車両番号はわからない。そこで、以下の手順でそれらの情報を補完し、運行実績ダイヤグラムを作成する。

Step 1 都営バスデータを時刻順にソートする。

Step 2 時刻の早い順に、それぞれの時刻において、終着停留所に近いバスから順に車両番号を割り振る。このときの車両番号は、前時刻において、ある停留所間を運行していたバスは、それより手前の停留所間に戻ることはないということに注意して、可能な限り小さな番号から割り振る。

Step 3 車両番号ごとに都営バスデータをまとめ、時刻順にソートする。

Step 4 車両番号ごとに、連続する2時点の都営バスデータを比べて、異なる停留所間を運行していた場合、後の時刻をそれらの間の停留所の停車時刻とする。

都営バスデータには欠損があるため、必ずしもすべてのバスの運行実績ダイヤグラムを作成できるわけで

表1 対象路線

系統	区間	本数
学02	高田馬場駅前 - 早大正門	200
橋63	小滝橋車庫前 - 新橋駅前	45
飯64	小滝橋車庫前 - 九段下	59
池65	江古田2丁目 - 池袋駅東口	69
上69	小滝橋車庫前 - 上野公園	60
高71	高田馬場駅前 - 九段下	39
宿74	新宿駅西口 - 東京女子医大前	66
池86	渋谷駅東口 - 池袋駅東口	131

はないが、本稿で対象とした路線では、運行本数の約95%を上記手順により作成できた。

2.3 遅延時間の分析

作成した運行実績ダイヤグラムを用いて、車両番号 k のバスの隣り合う二つの停留所 i と j の停車時刻の差を取り、その停留所間の実所要時間 $t_{ij}^{(k)}$ を算出する。

さらに、東京都交通局のホームページに掲載されている各停留所の時刻表をもとに、手作業で作成したダイヤグラム（運行予定ダイヤグラムと呼ぶ）を用いて、同バス同停留所間の予定所要時間 $\hat{t}_{ij}^{(k)}$ を算出する。

そして、停留所 i, j 間におけるバス k の単位時間当たりの遅延量を相対遅延 $d_{ij}^{(k)}$ と呼び、以下の式で与える。

$$d_{ij}^{(k)} = \frac{t_{ij}^{(k)} - \hat{t}_{ij}^{(k)}}{\hat{t}_{ij}^{(k)}} \quad (1)$$

さらに、停留所 i, j 間を運行するすべてのバスに対する平均相対遅延 \bar{d}_{ij} を以下の式で与える。

$$\bar{d}_{ij} = \frac{1}{n_{ij}} \sum_{k=1}^{n_{ij}} d_{ij}^{(k)} \quad (2)$$

ここで、 n_{ij} は停留所 i, j 間を運行するバスの本数である。同様に、停留所 i, j 間の平均実所要時間 \bar{t}_{ij} を算出する。池86系統において算出した平均実所要時間と平均相対遅延を図2に示す。

池86系統では、始発停留所から終着停留所までの所要時間を時間帯ごとに設定しており、ある程度の混雑は運行予定ダイヤグラムに織り込まれている。それにもかかわらず、図2をみると、原宿・新宿・高田馬場の鉄道駅や商業集積地周辺の停留所間で遅延が生じていることがわかる。

2.4 遅延時間推計モデル

前節で述べたように、遅延は鉄道駅や商業集積地などの周辺で発生している。そこで、遅延時間は周辺の

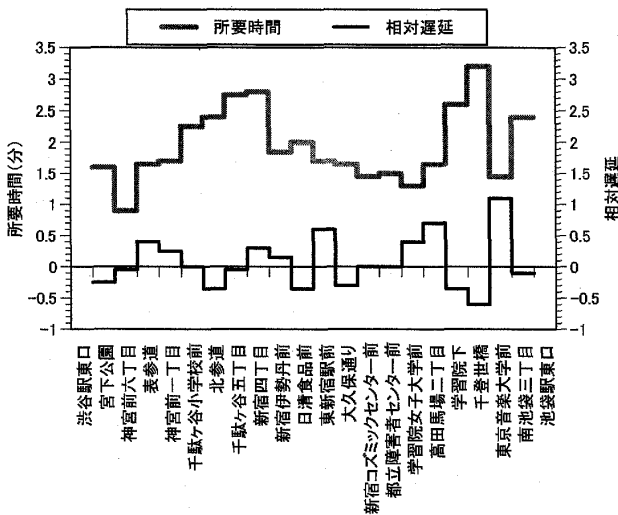


図2 池86系統の平均実所要時間と平均相対遅延

表2 遅延時間推計モデルにおける係数

	回帰係数	t 値
畑・農地	-0.0020	-2.0708
空地	0.0114	2.9217
工業	0.0071	3.0111
低層住宅	0.0029	3.2354
商業	0.0014	1.3375
道路	0.0022	1.3214
所要時間	-0.5488	-3.6993

土地利用の影響を受けていると仮定し、重回帰分析を用いて時間帯別に遅延時間推計モデルを構築する。時間帯は朝(6~11時)、昼(11~18時)、夜(18~24時)の3つとする。

目的変数は、連続する4つの停留所間における単位時間あたりの遅延時間とする。それぞれの時間帯におけるサンプル数は約40である。4つの停留所間を1つにまとめる理由は、都営バスデータは分単位で取得されているため、遅延時間も分単位でしか算出することができず、停留所間の所要時間が短いと丸め誤差が大きくなるからである。

説明変数は、国土地理院が刊行している「細密数値情報(10mメッシュ土地利用)」における畑・農地、空地、工業用地、一般低層住宅地、商業・業務用地、道路用地を各停留所の半径100m以内で集計した値と停留所間の平均所要時間とする。

ここでは、対象時間帯を朝とした重回帰分析の結果を示す。表2に得られた回帰係数を示す(土地利用に基づく変数の単位は100m²、所要時間の単位は分)。修正済み決定係数は0.476である。また、遅延時間推

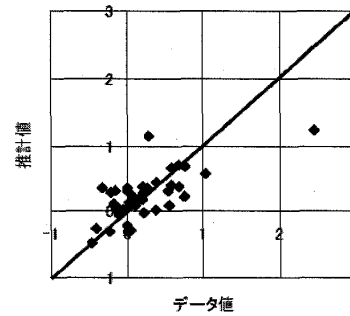


図3 遅延時間推計モデルによる遅延時間

計モデルより算出した停留所間の遅延時間を縦軸に、都営バスデータから算出した停留所間の遅延時間を横軸にとった散布図を図3に示す。修正済み決定係数は高くないものの、図3から、実際の遅延時間と推計値の傾向は概ね一致していることがわかる。

3. バス・鉄道ネットワークモデル

都市部では、郊外部と都市部を結ぶ鉄道路線や都市内の鉄道路線が張り巡らされており、多くの人々に利用されている。この鉄道路線を補完する役割を担っているのがバスであり、鉄道駅間を結ぶ路線や住宅地と鉄道駅とを結ぶ末端路線などが整備されている。人々は鉄道とバスを組み合わせた複数の経路の中から一つの経路を選び、出発地から目的地まで移動する。このような人々の移動を計算機上で表現するために、バス路線と鉄道路線とを組み合わせたバス・鉄道ネットワークモデルを構築する。このとき、人々が時々刻々と移動する状態を表現するためには、空間的な広がりに加えて時間的な広がりも考慮しなければならない。

ここでは、関西地域におけるバス運行会社8社が運行しているバス路線646路線(4,499停留所)と民間の鉄道事業者(私鉄)が運行している鉄道路線1,006路線(1,022駅)を対象とし(列車種別ごとに路線数をカウント)、路線上での人々の移動を表す時刻表(時空間)ネットワークを構築する。対象路線全体で、平日1日あたり約12万本のバスと電車が運行されている。対象路線を図4に示す。

時刻表ネットワークの構築方法の概要を示す。バス1台、電車1本ごとに、それぞれの停留所と鉄道駅(以下、停留所と鉄道駅をまとめて駅とする)をノードで表し、それらを結ぶリンク(走行リンク)で路線を表す。このとき、バスや電車などの公共交通機関には、駅を出発(到着)する時刻が定められているということを利用し、ノードに時刻を持たせる。さらに、

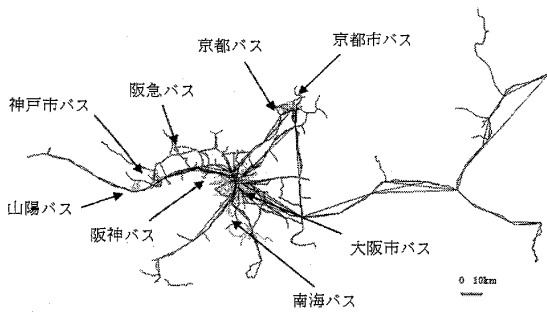


図4 対象路線

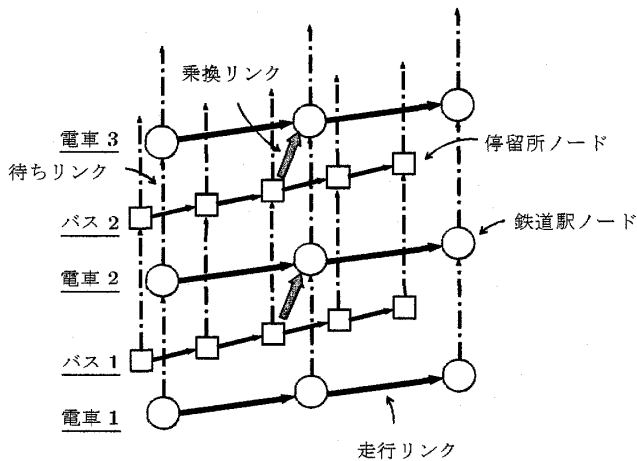


図5 ネットワークモデル

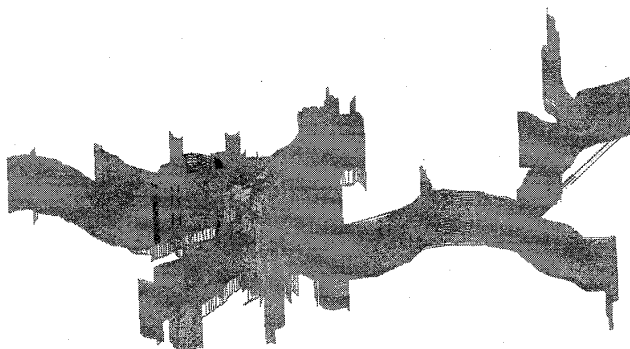


図6 時刻表ネットワーク

駅でバスや電車を待つことを表すために、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)を張るとともに、別の路線への乗換を表すリンク(乗換リンク)を加える(図5)。詳細な構築方法については文献[1]を参照されたい。

構築した時刻表ネットワーク(図6)は、2次元平面に時間軸を加えた3次元構造を有しており、単純な2次元平面上のネットワークと比べて、ネットワークの規模が大きくなってしまふものの、時間変化する流れを静的なネットワークの問題として扱うことができ

る。時刻表ネットワークのノード数は約116万、リンク数は約281万である。

4. 旅行時間と旅行経路の信頼性の評価

4.1 遅延を考慮したバス・鉄道ネットワークモデル

遅延時間推計モデルを、バス・鉄道ネットワークモデルの対象地域のバス路線に適用し、停留所間の遅延時間を推計する。そして、時刻表ネットワークにおけるノードを遅延時間分だけ時間軸方向にずらすとともに、乗換可能なバスや電車に変更がある際には乗換リンクを張りなおしてバスの遅延を表現する[2]。ただし、推計された遅延時間が負になる場合は、時間調整を行うと仮定し、遅延時間を零とする。この遅延を考慮したバス・鉄道ネットワークモデルを遅延ネットワークと呼ぶ。

この遅延ネットワークと時刻表ネットワークに対して、二駅間を同一時刻に出発して移動する最短時間経路をそれぞれ求め、旅行時間と旅行経路を比較する。すべての移動パターン(出発時刻、出発駅、目的駅)を比較するのは困難なため、出発時刻を7~9時、出発駅を神戸市バスの1路線の駅、目的駅をその他の駅とし、時刻、出発駅、目的駅の対をランダムに10万通り作成する。

4.2 旅行時間の信頼性

それぞれの移動パターンに対して、旅行者は旅行時間が最小となる経路を選択すると仮定し、Dijkstra法を用いて最短時間経路を求める。時刻表ネットワーク上の最短時間経路を旅行経路Aとし、その最短時間を旅行時間Aとする。ここで、旅行時間Aは、走行リンクで要した乗車時間Aと、待ちリンクと乗換リンクで要した待ち時間Aの和とする。同様に、遅延ネットワーク上の最短時間経路を旅行経路Bとし、その最短時間を旅行時間B(=乗車時間B+待ち時間B)とする。旅行時間、乗車時間、待ち時間について、それぞれ散布図を作成し、それらを図7に示す。

まず、旅行時間(図7(a))についてみると、右上がりの斜め45度線を中心として旅行時間の分布が大きく広がっており、ばらつきが大きいことがわかる。遅延時間を考慮すると、旅行時間Bは旅行時間Aと比べて長くなると考えられるが、逆に短くなるパターン、すなわち1節で述べたパターンも多く存在していることがわかる。次に、乗車時間(図7(b))についてみると、旅行時間とほぼ同様の傾向を示しているが、

ばらつきが旅行時間よりも少し小さい。最後に、待ち時間 (図 7(c)) についてみると、ばらつきが非常に大きいことがわかる。このことから、旅行時間のばらつきに影響を及ぼしているのは待ち時間であることがわ

かる。

乗車時間についてももう少し詳しく分析する。旅行経路 A と旅行経路 B において、乗車するすべてのバスと電車が同じ場合を「同一経路」、乗車するバスと電車が異なるものの同一路線である場合を「同一路線」、それ以外の場合を「異路線」とした 3 つの経路パターンに分類し、図 7(b) の乗車時間分布を分割する (図 8)。

まず、同一経路はほぼ 45 度線上に多くの点がプロットされており、遅延の影響をあまり受けていないことがわかる。次に、同一路線は同一経路よりもばらつきが大きく、遅延の影響を受けていることがわかる。最後に、異路線はばらつきが最も大きく、また乗車時間が短縮されるパターンが多くみられる。

4.3 旅行経路の信頼性

ここでは、移動パターンを前節で述べた 3 つの経路パターン (同一経路, 同一路線, 異路線) に分類し、旅行時間別にその比率を求める。異路線の比率が高いほど、別の経路を利用したほうが早く到着できるという意味で旅行経路の信頼性が低いと考える。

結果を図 9 に示す。10 分以内の近距離の移動パターン以外では、ほぼ半数以上が異路線であり、旅行経路の信頼性が大きく損なわれていることが分かる。京都市、大阪市などの都市部では、多くのバスと鉄道が運行されているため、乗り換えが容易に行えるということが原因として考えられる。

実際、駅を都市部と郊外部に分け、「都市部→都市部」、「都市部→郊外部」などの 4 通りの選び方の中から出発駅と目的駅を設定した移動パターンに対して、同様に旅行時間別の経路パターンを求めてみると、都市部を含む移動では異路線の比率が高いのに対し、郊外部から郊外部への移動では異路線の比率が低く、代替路線がないために旅行経路の信頼性が保たれているということがわかった。ここで、都市部と郊外部は、平成 7 年国勢調査、平成 8 年事業所・企業統計調査の 3 次メッシュの昼間人口・夜間人口データを用い、3 次メッシュ内の昼間もしくは夜間の人口密度が 4,000 人/km² 以上の地域を都市部とし、それ以外の地域を郊外部とした。

5. おわりに

本稿では、バスの遅延に注目し、現状の運行スケジュールと運行実績とを比較することで遅延特性を分析した。さらに、バスの遅延が及ぼす影響をバス路線と

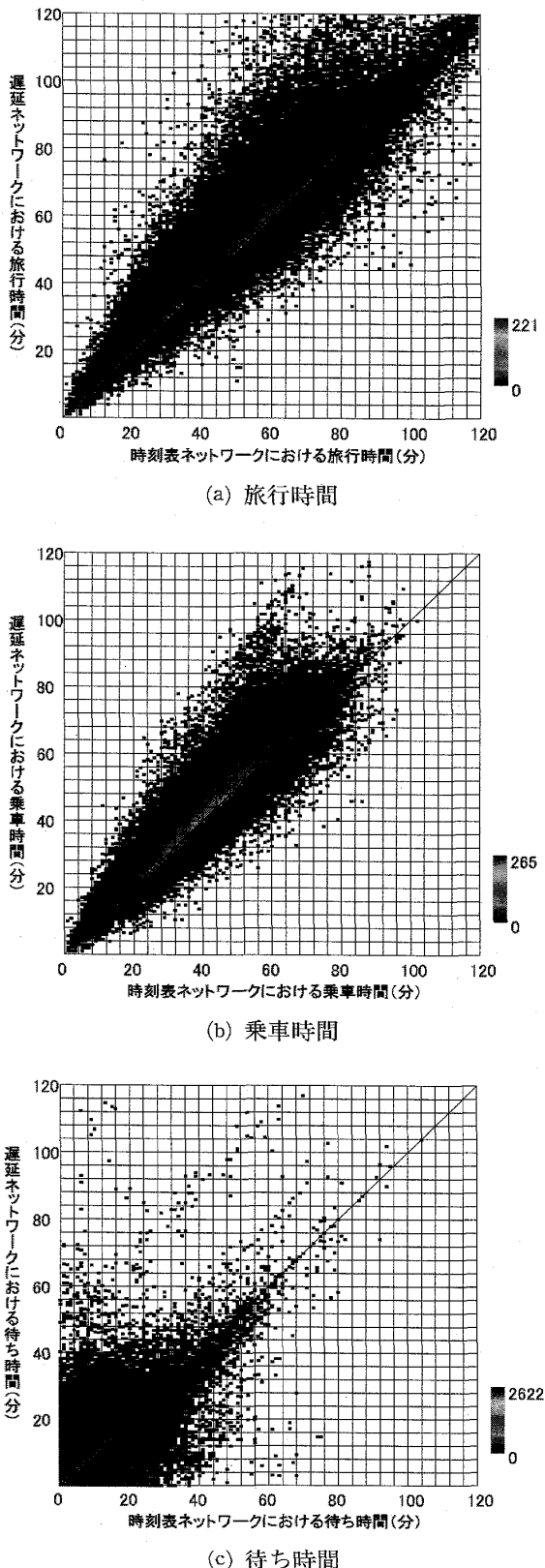
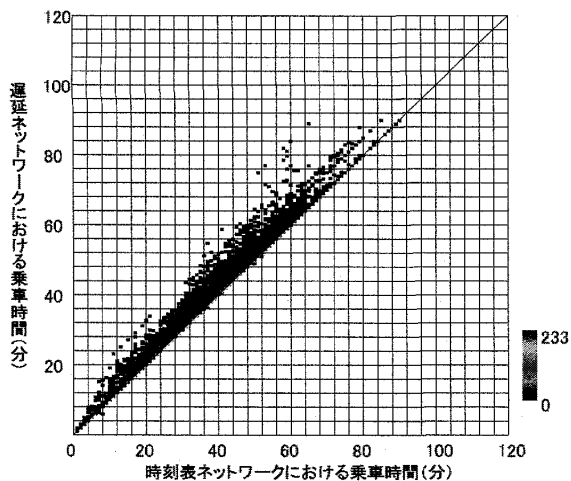
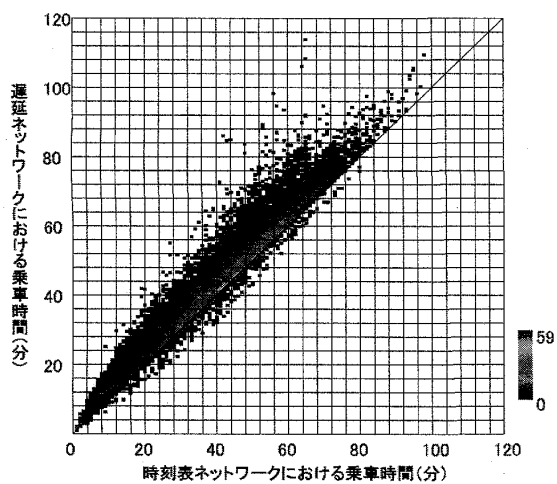


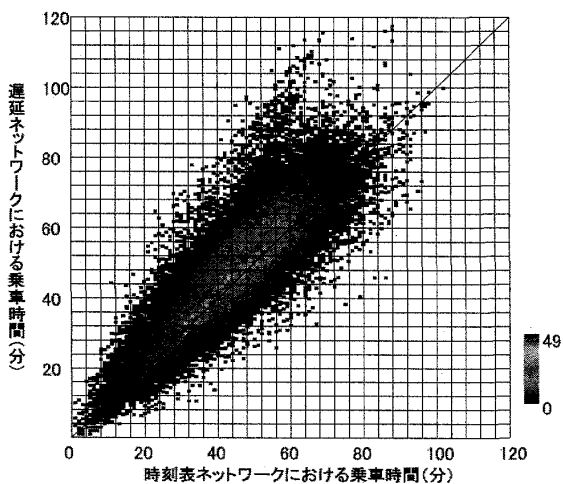
図 7 旅行時間・乗車時間・待ち時間の比較



(a) 同一経路



(b) 同一路線



(c) 異路線

図8 経路パターン別乗車時間

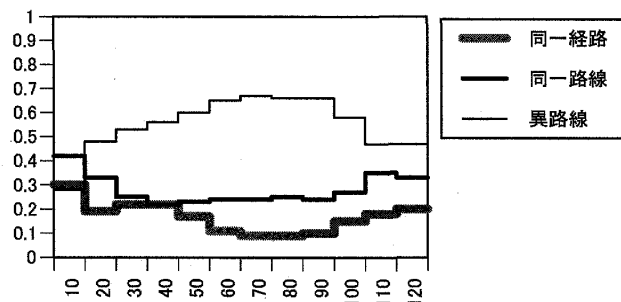


図9 旅行時間別経路パターン

鉄道路線を組み合わせた時空間ネットワークを用いて分析し、旅行時間と旅行経路の信頼性を評価した。その結果、郊外部での移動よりも都市部での移動のほうが、旅行経路の信頼性が低いことがわかった。

さらに現実的な評価を行うためには、

- バスの遅延は、周辺の土地利用だけでなく、天候や利用者の乗降などの影響も受けている。
- 人々の移動パターンをランダムに与えたが、現実には移動パターンには偏りが存在する。
- 経路選択の際、現実には旅行時間だけでなく、運賃や混雑なども考慮している。

なども考慮する必要があるだろう。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.