

## バスプローブデータを利用した所要時間信頼性評価手法の構築\* Evaluation Method of Travel Time Reliability Using Bus Probe Data\*

宇野伸宏\*\*・永廣悠介\*\*\*・飯田恭敬\*\*\*\*・田村博司\*\*\*\*\*・中川真治\*\*\*\*\*  
By Nobuhiro UNO\*\*, Yusuke NAGAIHRO \*\*\*, Yasunori IIDA\*\*\*\*, Hiroshi TAMURA\*\*\*\*\*, Shinji NAKAGAWA\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

#### (1) 研究の背景と目的

近年、社会・経済活動の高度化に伴い社会インフラである道路ネットワークに対しても円滑かつ安定的な交通サービスの供給が求められている。従来、利用可能な交通データや計測技術の制約のため、道路交通のサービス水準を評価する際の重要な指標として、目的地までの所要時間の1回もしくは数回程度の実測値、あるいは、交通量配分による推定値が、多くのケースで用いられてきた。この種の所要時間は、交通サービスの円滑性を相対的に評価するうえでは有用な評価指標と考えられるが、交通サービスの安定供給の観点からは、所要時間の変動に注目することも必要と考えられる<sup>1)</sup>。

一方、ITS 技術の中でより詳細に広範囲の道路交通状況を把握するシステムとして、プローブカーの利用が進められている。この時々刻々での道路交通状態を把握可能なプローブカーを有効活用し、道路ネットワークを多面的に評価するための方法論を構築することは、重要な課題である。本研究では、これまでに多数の詳細データが収集・蓄積されている、路線バスによるプローブカーデータの有効活用を図り、所要時間信頼性の観点から道路交通のサービスレベルを評価するためのデータ解析手法の提案を目指す。

#### (2) 既存研究と本研究の位置づけ

プローブカーとは、自動車を移動体としての交通観測モニタリング装置と捉え、きめ細かな交通流や交通行動、位置情報、車両挙動、さらには気候や自然に関わる状況をモニタリングするシステムを指す。プローブカーの利用により、時間的・空間的に連続した交通データの収集・利用も可能となりつつある。プローブカーから得られる各種のデータ（以下では「プローブデータ」と略記）を

用いた研究も盛んに進められてきている。道路のサービス水準を表す指標を得ることを目的とした研究としては、路線バスにより収集したプローブデータを用いて、リンク旅行速度・旅行時間を計測した研究<sup>2)</sup>、一般道路のQ-V特性をプローブデータと交通量常時観測データを用いた研究<sup>3)</sup>、タクシープローブにより積雪地帯における雪提による速度低下と排雪による速度回復の定量化を試みた研究<sup>4)</sup>、そして、プローブデータとして得られる旅行速度を用いて都道府県別や都市圏別の渋滞損失量を求めた研究<sup>5)</sup>等、多くの研究事例が見受けられる。また、プローブカーとしていかなる車種を採用するのが望ましいかという点を議論すべく、タクシー、バス、塵芥車、その他の商用車を用いて、約1ヶ月にわたる収集データより車種別の運行特性を分析した研究<sup>6)</sup>もある。バスプローブにより得られたデータの特性を把握するため、本論文の著者らは、設定バスダイヤからの乖離時間ならびに曜日別・時間帯別・区間別での平均速度等の比較・分析を行った<sup>7)</sup>。後述する対象系統の一部に対する分析結果より、設定されたダイヤを基準とした場合、遅延が多く発生する傾向にあり、とりわけ土曜日の遅延の程度が顕著に表れていることが分かった。ダイヤ自体は、曜日別・時間帯別に設定されており、交通変動を考慮したものとなっていると推測されるが、分析対象エリアの混雑のため、遅延が常態化する傾向にあると考えられる。

旅行時間の把握にプローブデータを活用した研究としては、対象区間を完全に通過するプローブデータのみではなく部分的に通過するデータも併せ用いて、区間旅行時間の期待値や分散を推定する方法を提案した研究<sup>7)</sup>もある。分析対象区間が長くなり、完全通過するプローブカーが減少する場合に有用な方法である。本論文の4章で述べる所要時間分布の合成方法の中でも、上記の研究と同様の方法を用いて、異なるバス系統として収集された所要時間分布同士の平均値ならびに分散の和を求めている。

ところで所要時間信頼性は、あるドライバーが特定のODペア間を移動する場合に、その所要時間がある基準時間を超過する確率として評価されると定義される<sup>1)</sup>。非常に簡単な例ではあるが、同一OD間を結ぶ2つの経路があり、その所要時間分布が図-1の様に得られている

\*キーワード: ITS, ネットワーク交通流, 交通計画評価

\*\*正員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻  
京都市左京区吉田本町, TEL075-753-5125, FAX075-753-5907  
e-mail uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

\*\*\*正員 NEC

\*\*\*\*フェロー 京都大学名誉教授, (社)システム科学研究所会長

\*\*\*\*\*学生員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

\*\*\*\*\*正員 (社)システム科学研究所

ケースを想定しよう。

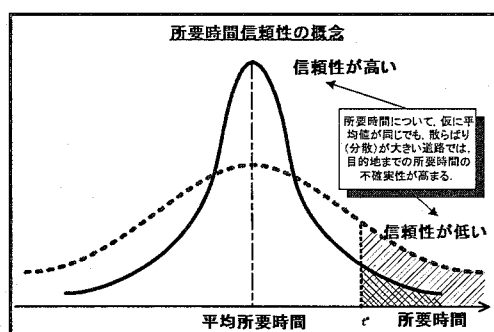


図-1 所要時間信頼性の概念図

この場合2つの経路の所要時間の平均値は同じであるが、変動の幅は破線で示された分布の方が大きく、ある基準時間 $t$ を超過する確率も破線の所要時間分布の方が大きくなっている。換言すれば所要時間の点でより安定的な交通サービスの提供が期待されるのは、図中実線で示された所要時間分布を持つ経路と言える。

本研究では、路線バスを利用したプローブ調査（以下「バスプローブ」と略記）で得られたデータを用いて、あるOD間の経路の所要時間分布を推定する。バスプローブは予め定められた路線上の交通状態のみを把握するものであるが、その反面、特定区間を高頻度で繰り返しバスが走行するため、所要時間分布に関する情報を得るためには、非常に有用である。本研究では、このバスプローブの利点を活かして、所要時間信頼性の観点から道路ネットワークのサービス水準を評価することを目指す。

ところで、路線バスによるプローブ調査では、一般的な交通状態を把握することが難しいと言われる。この原因としては、a)バスという車両の走行特性（乗用車より加速性能等で劣る）、および、b)バス停での停止による遅れ時間の影響が考えられる。本研究の対象エリアは、路線バスが複数系統運行されており、このプローブデータを用いて、道路ネットワークの所要時間信頼性評価が可能と目されるエリアである。一方、前述の通り<sup>8)</sup>都市化されたエリアの道路網であるが故に、交通混雑の常態化の傾向も強いと言える。このようなエリアにおいては、上記a)の影響は相対的に小さくなり、b)の影響を主に考慮すれば良いものと考えられる。そこで、本研究では3章においてバス停停止に伴う遅れ時間の補正方法について提示することとする。

## 2. 分析対象データ

### (1) バスプローブデータ

本研究では、国土交通省近畿地方整備局によりプロー

ブデータ収集端末が設置され、データの収集・蓄積されているバスプローブデータのうち、京阪バス枚方営業所管内を走行する路線バスのデータを利用した。利用したデータは2003年12月13日から24日までの12日間のもので、バス1台1日の1日の走行データが記録されている。利用するバスプローブデータにはバス運行に関連した情報（系統番号、始発バス停での出発記録、終点バス停での到着記録など）が記録されていないことも考慮すると、研究対象とするバス路線のデータを効率良く抽出し取り扱う手法を構築することが必要である。

### (2) バス乗り込み調査データ

上述したバスプローブデータは、GPSを搭載したバスの動き（バスの走行位置の緯度経度情報）を1日単位で記録したものであり、バス停での停車の有無・時間、始発バス停での出発記録、終点バス停での到着記録などの情報は記録されていない。とりわけ、路線バスの場合、バス停での旅客の乗降に伴う遅れ時間があるため、バス以外の一般的な道路利用者が経験する所要時間と路線バスの所要時間とは乖離が生じる可能性が考えられる。バスプローブデータに基づき行われるサービス水準評価が、より一般の交通のそれに近づくようにするため所要時間の補正を行うが、補正方法を検討するための基礎データを得る目的で、路線バスへの乗り込み調査を行った。2003年12月17日・21日の二日間、プローブデータ記録端末を持った調査員が対象路線バスに乗り込み、プローブカーデータと同様に1秒毎に緯度・経度等の位置座標、バスの走行速度や進行方向を記録した。この調査ではさらにバス運行の開始時刻・終了時刻、各バス停への停止時刻等も併せて調査員が記録した。

### (3) 乗用車プローブ併走調査

バス乗り込み調査に加えて、乗用車プローブによる併走調査も行った。これはバス乗り込み調査と同じ日時に、プローブデータ記録端末（GPS+PDA）を装着した乗用車でバス路線上进行し、走行位置座標や走行速度データを記録したものである。走行に際しては交通の流れに乗り、路線バスとは関係なく自由に走行するように指示を与えた。このデータを一般の交通状態を表すものとみなして、所要時間の補正方法を検討する際に参考とする。

## 3. バスプローブデータの補正方法

バスプローブデータを用いて、あるOD間の所要時間分布を推定するため、以下の4段階のデータ処理を行う。

- i) 運行系統単位でのプローブデータの抽出
- ii) バス停停止に伴う遅れ時間の補正
- iii) 実測所要時間分布と理論分布の適合性検証

#### iv) 所要時間分布の合成

本章では上記の i) および ii) について順次説明し、iii) および iv) については、次の 4 章でその内容を述べることにする。

#### (1) 運行系統単位でのデータ抽出

まず、1 日分の走行軌跡から検討対象となるバス路線の走行軌跡のみを切り出す作業を行う。具体的には各バス系統に含まれる全てのバス停位置座標を列挙したバス停位置座標テーブルを用意する。このバス停位置座標テーブルとプローブデータを照らし合わせ、バス停位置座標テーブルに記録されたバス停座標の近傍を座標テーブルの順に従って通過するプローブデータを対象系統のバス運行とみなした。次にこのバス運行データに対し 1 次元化の処理を施す。本研究で用いるプローブ位置データは GPS により得られる緯度・経度であり、誤差により対象路線の道路リンク上から外れた地点情報が記録されていることもある。このようなデータを道路リンク上へ戻す操作（吸着処理）を行うことで、バスの走行軌跡をバス路線に沿った距離成分のみで表現可能となる。バスプローブデータを用いる場合、吸着先の道路リンクが与件であるため複雑なマップマッチング処理が不要である。

まず、吸着先のバス路線を複数のリンクの集合として表す。プローブ観測点の道路リンクへの吸着処理はそれぞれの観測点について独立して行い、時間的に前後となる観測点の状況は考慮していない。各プローブ観測点をどの道路リンクに吸着させるかの選択は、プローブ観測点から道路リンクまでの距離を用いて決定する。本研究ではプローブ観測点から各道路の距離が最も短いリンクに対して、最も近い位置へその観測点を吸着させる。

#### (2) バス停停止に伴う遅れ時間の補正

道路ネットワークにおける一般車両の走行特性と路線バスの走行特性との差異は、バス停での停止の有無、走行車線の違い、自由走行速度の大小等に起因する。本研究では、このうちバス停での停止に着目し、バスプローブが計測した交通状態を一般交通が遭遇する交通状態に近づけるための補正方法を提案する。

##### a) バス停停止判定法

バスの走行軌跡の中で、バスプローブデータの位置座標、速度、及びバス停位置座標データを用いてバス停への停止を判定する。時点  $t$  における走行速度を  $v_t$ 、その路線上のバス停  $i$  までの距離を  $l_u$  とする。バス停での停止判定結果  $R_u$  を次のように定義する。

$$R_u = \begin{cases} 1 & \text{バス停停止} \\ 0 & \text{バス停停止以外} \end{cases} \quad (1)$$

バス停での停止判定は次式で表される。

$$\text{if } v_t \leq V \text{ and } l_u \leq L \text{ then } R_u = 1 \\ \text{else } R_u = 0 \quad (2)$$

ただし、 $V$  はバス停停止と判定する速度の上限値、 $L$  はバス停までの距離の上限値である。2. (2) で述べたバス乗り込み調査の結果より、各バス停への停止の有無ならびに停止時間の情報が得られている。この情報とバスプローブデータを併せ用いて分析し、式(2)の  $V$  および  $L$  を適宜設定した。本研究では  $V=3.0\text{km/h}$ 、 $L=23.7\text{m}$  としてバスプローブデータに関する停止判定を行った。この条件下で、全プローブデータ中、正しく停止もしくは走行状態が判別されたものが約 92% に達した。

##### b) バス停停止前後の減速・加速判定法

バス停での停止による減速・加速に伴う遅れも路線バスプローブと一般車両の走行特性との乖離に大きな影響を与えていると考えられるため、その影響を除去する手法について説明する。バス停停止に伴う“減速”モードについては、“バス停停止”モードと判定された時間帯の直前のデータを対象として速度が単調減少し続ける時間帯のデータを抽出する。バス停停止後の“加速”モードについてもほぼ同様の手順で判定を行う。“バス停停止”モード直後から連続した時間帯で、速度が単調増加し続けるデータを“加速”モードとして判定する。

##### c) バス停停止に伴う遅れ時間の除去

バス停停止、減速、加速の各モードと判定されたデータを対象として遅れ時間を除去する。“バス停停止”モードと判定された時間帯については、その時間を全て所要時間から除去する。次にバス停停止直前の“減速”モードについては、減速前の速度  $V_d$  が継続していると仮定し、減速中に走行した距離  $L_d$  を速度  $V_d$  で走行するのに要する時間  $L_d/V_d$  を“減速”モードの時間  $T_d$  から差し引いた  $T_d - L_d/V_d$  を除去する。バス停停止直後の“加速”モードに関しても同様に、加速後の速度  $V_a$  が継続していると仮定し、加速中に走行した距離  $L_a$  を速度  $V_a$  で除した  $L_a/V_a$  を“加速”モードの時間  $T_a$  から差し引いた  $T_a - L_a/V_a$  を除去する。図-2 に以上の手順を示す。上記 a)、b) および c) のプロセスを経て補正を施した後のバスプローブの走行軌跡の例を図-3 に示す。明らかに補正後のバスプローブの走行軌跡と乗用車プローブのそれとは類似の傾向を示していることが分かる。すなわち、3. (2) で述べたバスプローブデータの補正法を用いることで、一般の交通が被る所要時間により近づけた形で、道路のサービス水準評価を行うことが可能になると考えられる。

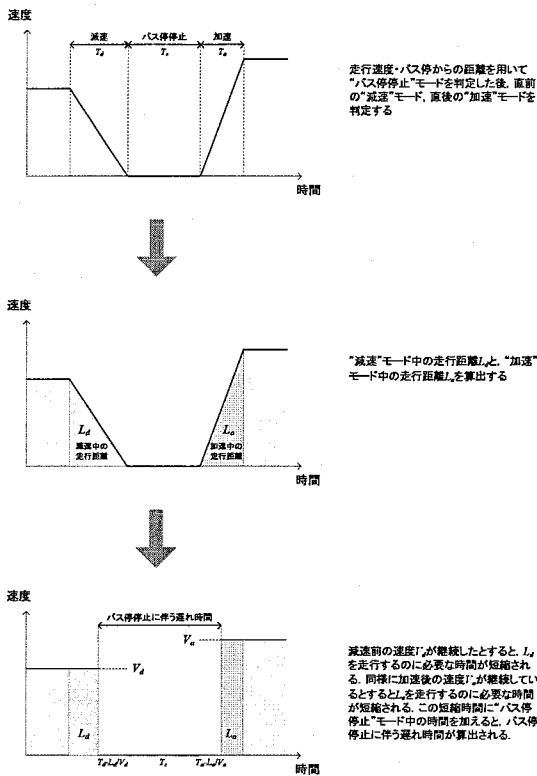


図-2 バス停停止に伴う遅れ時間の補正

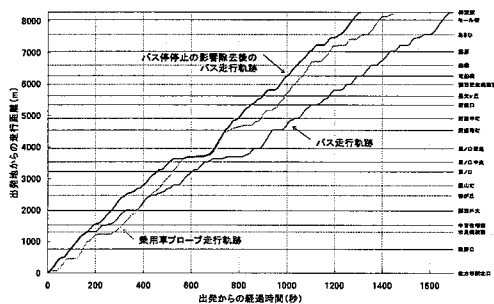


図-3 補正後のバス走行軌跡の例

#### 4. 主要地点間の所要時間変動の推定方法

本章ではバスプローブにより実測され、補正が施された所要時間分布について、その理論分布への適合性を検証するとともに、所要時間分布の合成により、バスネットワーク上の任意のOD間経路の所要時間を推定するための手法を提案する。

##### (1) 分析に用いたバス路線

本章および次の5章の分析では、前述の近畿地方整備局バスプローブデータの中から対象バス路線として、京阪バス枚方営業所20系統(京阪枚方市駅・JR長尾駅間)、

39系統(京阪枚方市駅・京阪樟葉駅間)、94系統(京阪樟葉駅・JR長尾駅間)の3つを選択した。これら3系統は運行頻度が高く(1時間あたり2~4運行以上)データ数が多いこと、国道1号と接近・交差しており時間帯による交通状態の変化が顕著であること、各路線が一部区間で重なっており、相互の関係を分析できること、そして、同じ起終点間をつなぐ2経路を構成することができ、経路毎の所要時間特性の評価ができることから検討対象路線として選択した。本研究では、バスプローブデータを活用した道路ネットワークの所要時間信頼性の評価方法の構築を目指しており、4章および5章での実データに基づく分析内容は、1日の中での交通状態の時間変動は明示的に考慮していない。しかしながら、道路ネットワーク上の混雑状況は、1日の中でも大きく変化しており、時間帯別(朝ピーク、昼間帯、タピーク等)でサービス水準評価を行うことも、今後必要になると考えられる。このような観点から、朝から夜まで各時間複数のバス運行が行われている系統を、分析対象として選定した。

3つの路線のバス停数、路線長を表-1に、路線概要図を図-4に示す。

表-1 各路線のバス停数と路線長

| 系統   | 起点   | 終点     | バス停数 | 路線長(km) |
|------|------|--------|------|---------|
| 枚方20 | 枚方市駅 | ⇒ 長尾駅  | 19   | 6.6     |
|      | 長尾駅  | ⇒ 枚方市駅 | 19   | 6.3     |
| 枚方39 | 枚方市駅 | ⇒ 樟葉駅  | 21   | 8.3     |
|      | 樟葉駅  | ⇒ 枚方市駅 | 21   | 7.9     |
| 枚方94 | 樟葉駅  | ⇒ 長尾駅  | 21   | 7.2     |
|      | 長尾駅  | ⇒ 樟葉駅  | 21   | 7.3     |

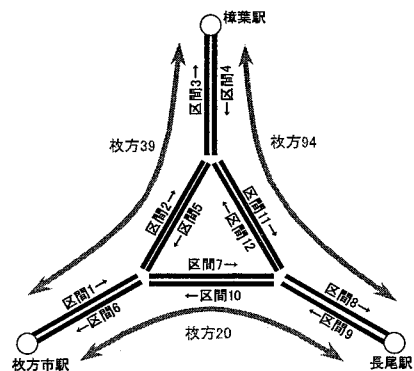


図-4 路線概要図

##### (2) 実測所要時間分布の理論分布への適合

図-4に示した12区間について、実測の所要時間分布の形状ならびに理論分布への適合性について分析した。次の(3)で述べるように、平均値や分散といったパラメータは異なる計測区間単位で合成可能である。所要時間が何らかの理論分布に従っていると仮定できれば、この合成後パラメータを用いて、路線バスが直接結んでいない、あるOD間の所要時間分布の形状を概ね把握することも可能と考えられる。各区間の所要時間を集計し、所要時

間の頻度分布（棒グラフ）として表した。このうち、図-5に一例として区間10の所要時間分布を示す。

12の分布形に共通する特徴は、分布形の左側（所要時間が短い側）の立ち上がりが急で、右側は比較的なだらかなことである。このような特徴を持った理論分布として、確率密度関数が式(3)で表される対数正規分布が考えられる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left\{-\frac{(\log x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right\} \quad (x > 0), \quad 0 \quad (x \leq 0) \quad (3)$$

ここで  $\mu_x$ ,  $\sigma_x$  はそれぞれ所要時間  $x$  の自然対数  $\log x$  についての平均、標準偏差である。

図-5の折線グラフは、対数正規分布の理論分布であり、計測された区間10の所要時間の平均値および分散と等しい分布である。この折線グラフと実測度数の分布を表す棒グラフは類似の形状と言える。そこで、これらの区間所要時間実測データが対数正規分布に従うとの帰無仮説を立て、適合度検定を行うことにした。表-2に有意水準  $\alpha=0.05$  で行った  $\chi^2$  検定の結果を示す。

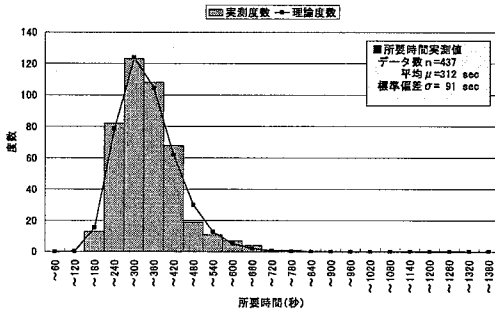


図-5 実測区間所要時間分布と理論分布の比較

表-2 実測区間所要時間分布の理論分布への適合性

| 区間   | データ数 | 対数正規分布への適合度カイ二乗検定 |        |        | 結果     |
|------|------|-------------------|--------|--------|--------|
|      |      | 自由度               | 臨界値(※) | カイ二乗値  |        |
| 区間1  | 874  | 22                | 33.92  | 156.77 | 棄却     |
| 区間2  | 355  | 22                | 33.92  | 18.60  | 棄却されない |
| 区間3  | 692  | 22                | 33.92  | 27.99  | 棄却されない |
| 区間4  | 636  | 22                | 33.92  | 30.55  | 棄却されない |
| 区間5  | 327  | 22                | 33.92  | 13.36  | 棄却されない |
| 区間6  | 764  | 22                | 33.92  | 143.93 | 棄却     |
| 区間7  | 519  | 22                | 33.92  | 75.25  | 棄却     |
| 区間8  | 828  | 22                | 33.92  | 674.39 | 棄却     |
| 区間9  | 774  | 22                | 33.92  | 237.29 | 棄却     |
| 区間10 | 437  | 22                | 33.92  | 10.64  | 棄却されない |
| 区間11 | 309  | 22                | 33.92  | 22.74  | 棄却されない |
| 区間12 | 337  | 22                | 33.92  | 22.71  | 棄却されない |

※有意水準  $\alpha=0.05$

12区間のうち、5区間については実測データが対数正規分布に従うという仮説が棄却されてしまったが、残りの7区間については仮説が棄却されなかった。仮説が棄却された区間の所要時間分布については、理論分布から大きく外れた実測データが幾つか見受けられ、これが  $\chi^2$  検定の結果に影響を及ぼしているものと考えられる。区間1、区間6、区間8、区間9については、鉄道駅に接続する区間であり、駅周辺は建物の高さ・密度がともに高く、GPS測定精度が低下するため、データ抽出過程にお

いて運行開始・終了時刻が正しく判定されず、区間所要時間の取得精度が低下している可能性が考えられる。

本研究では、バスプローブデータを用いてOD間の所要時間信頼性を評価するための分析フレームを提示することを目指している。この研究目的を踏まえつつ、半数以上の区間について仮説が棄却されなかった点、ならびに、理論分布を仮定することにより分析結果の解釈が容易になる点を考慮に入れ、以後の議論では所要時間分布は対数正規分布に従うとみなすこととした。実測所要時間の分布特性については、今後の研究の中で、対象区間の道路特性や距離、信号交差点数などを影響要因の候補として分析を継続する。

### (3) 所要時間分布のパラメータの合成

本研究ではバスプローブデータを用いているため、ある一つのバス路線上に存在しないOD間経路の所要時間については、直接観測できないことは自明である。本研究では、バス路線ネットワーク上に存在する任意のOD間経路の所要時間分布を推定するため、異なるバス路線の所要時間分布を合成するための方法を提案する。図-6にはA, B, Cの3路線のバスが運行されている状況を例示する。この場合図中の出発地・目的地間の所要時間は直接計測されないが、路線Aの区間A-i、路線Bの区間B-j、路線Cの区間C-kの組み合わせにより、求めたいOD間経路の所要時間分布の推定が可能になる。

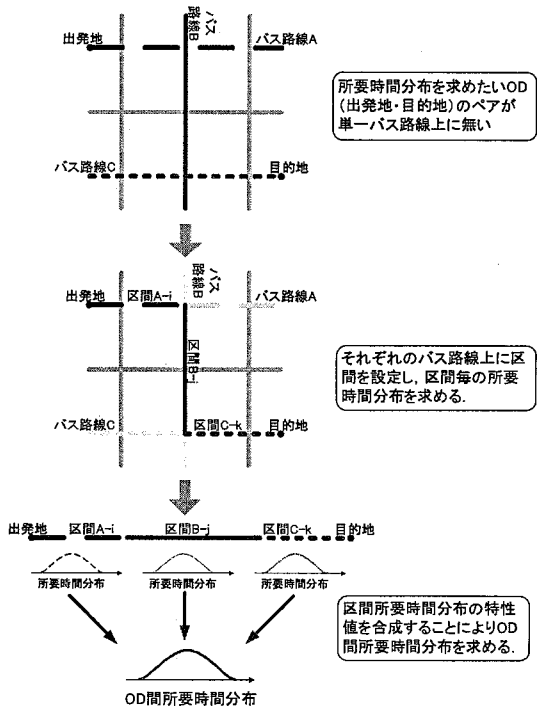


図-6 所要時間分布合成の概念図

ここで所要時間分布の合成について統計学的な面から考察する。一般に分布同士の合成を考える場合、分布の平均値（期待値）は常に加法性が成り立つ。確率変数  $X_1, X_2, \dots, X_n$  を足し合わせた確率変数  $Z$  を考える。

$$Z = \sum_{i=1}^n X_i \quad (4)$$

この時、確率変数  $Z$  の平均値  $E(Z)$  は、確率変数  $X_i$  の平均値  $\mu_{X_i}$  を用いて

$$E(Z) = \sum_{i=1}^n \mu_{X_i} \quad (5)$$

と表される。一方、分散については確率変数  $X_i$  の標準偏差  $\sigma_{X_i}$ 、確率変数  $X_i$  と  $X_j$  の相関係数  $\rho_{X_i X_j}$  を用いて、

$$V(Z) = \sum_{i=1}^n \sigma_{X_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \rho_{X_i X_j} \quad (6)$$

と表される。参考文献<sup>7)</sup>で用いられている方法と共通するが、式(6)の相関係数  $\rho_{X_i X_j}$  が何らかの方法で推定できれば、式(5)および式(6)を用いて異なる路線に含まれる連続する区間の所要時間分布のパラメータ（平均値・分散）を合成することができる。しかしながら異なる調査路線に含まれる連続する区間について、所要時間の相関係数を算出することは、所要時間データのマッチングの困難さ故に、直接的には難しい。本研究では、各区間を通過した路線バスの所要時間を1時間毎に集計し、その時間帯毎の平均所要時間についてマッチングを行い、相関係数を算出することで対処している。この様な対応をすることで、式(6)に含まれる相関係数の値が過小評価され、その結果、合成後の所要時間の変動も過小評価される可能性が考えられる。その一方、当該区間の通過時刻等に基づき、異なる路線間のプローブデータを詳細にマッチング処理する等の労力が省かれるため、将来的な大規模ネットワークへの適用上、有利な点もある。本研究では、このデータ処理に要する労力を大きく削減できる点を評価し、1時間帯毎の平均所要時間で算出した相関係数を、式(6)の  $\rho_{X_i X_j}$  として用いることとする。

#### (4) 合成所要時間分布の実測分布に対する適合度

4.(2)および(3)の内容を踏まえて、図-4に示した3系統各2方向を対象として、試みに合成所要時間分布を求めてみる。各系統とも便宜上3つの区間に分割しており、ここでは敢えて、各区間の実測所要時間分布を合成し、

起終点間の分布を推定してみる。この場合は各起終点間での実測所要時間分布も利用可能であるので、これと上記の合成所要時間分布との適合度を検証してみる。なお、合成後の所要時間分布は対数正規分布に従うと仮定する。

図-7は、枚方39系統樟葉駅発枚方市駅行きの所要時間分布について、実測分布と区間4・5・8の所要時間分布を合成したものとをあわせて示している。図-7では棒グラフが実測分布を、折線グラフが合成分布を示す。分布形を比較すると概ね形状は同じように見て取れる。そこで実測分布が、区間所要時間分布の合成により得られた対数正規分布に適合するとの帰無仮説を設定して適合度検定を行った。検定結果を表-3に示す。

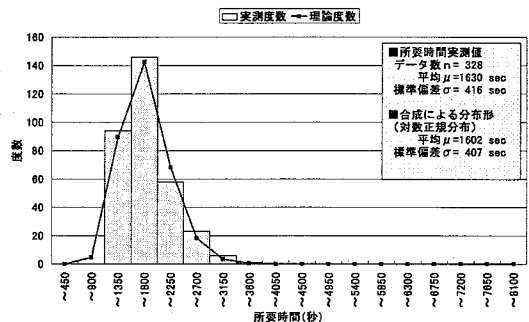


図-7 実所要時間分布と合成分布との比較

6運行パターン中2つについては帰無仮説が棄却されたが、4運行パターンでは棄却されなかった。仮説が棄却された2つは起終点が枚方市駅と長尾駅であり、区間所要時間算出時と同様、データ抽出過程において運行開始・終了時刻が正しく判定されていない可能性も考えられる。ここでは6運行パターン中4つで帰無仮説が棄却されなかったことを踏まえ、提案した所要時間分布の合成手法は、任意のOD間経路の所要時間分布を推定する上で有効である可能性が高いと考える。

本研究では、直接計測された区間の所要時間分布、ならびに複数の計測区間について合成した所要時間分布、ともに理論分布としては対数正規分布に従うものと仮定して、適合度検定により妥当性の検証を試みた。しかしながら、評価対象の経路やODが、より多くの単位（計測）区間から構成されると見なし、各単位区間の所要時間を、確率変数として捉えたと、「中

表-3 合成所要時間分布と実測分布の適合性

|      |      |      | 所要時間(秒) |      | 合成による所要時間(秒) |      | 対数正規分布への適合度カイニ乗検定 |        |       |        |
|------|------|------|---------|------|--------------|------|-------------------|--------|-------|--------|
| 系統   | 行き先  | データ数 | 平均      | 標準偏差 | 平均           | 標準偏差 | 自由度               | 臨界値(※) | カイニ乗値 | 結果     |
| 枚方20 | 長尾駅  | 521  | 1121    | 226  | 1137         | 228  | 18                | 28.87  | 45.29 | 棄却     |
|      | 枚方市駅 | 439  | 1153    | 299  | 1175         | 330  | 17                | 27.59  | 44.04 |        |
| 枚方39 | 樟葉駅  | 354  | 1531    | 283  | 1495         | 302  | 20                | 31.41  | 29.21 | 棄却されない |
|      | 枚方市駅 | 328  | 1630    | 416  | 1602         | 407  | 17                | 27.59  | 9.72  |        |
| 枚方94 | 長尾駅  | 308  | 1364    | 139  | 1362         | 165  | 19                | 30.14  | 28.97 | 棄却されない |
|      | 樟葉駅  | 335  | 1371    | 233  | 1394         | 249  | 18                | 28.87  | 27.36 |        |

※有意水準  $\alpha=0.05$

心極限定理」を適用することで正規分布を仮定して、対象となる所要時間分布を評価することも考えられる。この点に関する検討は、今後の検討課題としたい。

## 5. 所要時間分布を用いた経路特性の評価

### (1) 所要時間信頼性から見た経路特性分析

ここでは、同一地点間を結ぶ異なる2経路を対象として、その所要時間分布を推定し、所要時間信頼性の観点から経路特性を比較分析する。ここでは図-4に示した区間11のみから成る経路（経路A）と、区間5と区間7から構成される経路（経路B）の2経路を対象とする。経路Bの所要時間分布については、4章で提案した方法を用いて区間5と区間7の所要時間分布を合成することで推定する。また、ともに対数正規分布に従うと仮定して、以下の考察を進める。図-8は上記の2経路の位置関係を示している。表-4には各経路の経路長、所要時間の平均値と標準偏差（ともに秒単位）を示す。経路Bの所要時間の平均値・標準偏差は、式(5)および式(6)を用いて推定したものである。

図-8より明らかではあるが、ともに国道1号を横断する経路であり、特に経路A（区間11）は短距離ではあるが、国道1号を走行する区間を含んでいる。表-4より、2経路ともに4km強の距離であり、所要時間の平均値も経路Aが780秒、経路Bが798秒で非常に近い値を示していることが分かる。一方、所要時間の標準偏差に関しては大きな違いが生じている。経路A（区間11）が92秒であるのに対して、経路B（区間5+区間7）では197秒に達している。すなわち、経路Bの方が所要時間信頼性の点で相対的に劣る可能性が高い。

図-9は対数正規分布を仮定した場合の所要時間分布（累積分布図）を示している。経路B（区間5+区間7）の所要時間変動の大きさが視覚的にも確認される。例えば、累積分布図を用いて所要時間の85パーセンタイル値を求めてみると、経路Aでは874秒であるのに対して、経路Bでは997秒に達する。このバスプローブデータを用いた分析結果からは、経路A（区間11）の方が所要時間信頼性の点で相対的に優れていると言える。このケーススタディを通して、バスプローブデータから得られる所要時間分布ならびにその合成分布を利用することにより、経路特性を所要時間信頼性の観点から評価することが、より容易になることが示された。

なお本研究では、道路ネットワークのパフォーマンスを所要時間信頼性の観点から分析・評価するための方法論の構築を主目的としている。そのため、所要時間の変動に関する分析内容は、ある距離を有する区間やOD間を対象としたマクロな分析を主としている。しかしながら、一般道路の所要時間変動は交差点での遅れに強く影

響を受けていることは明らかである。そこで、今後の研究課題として、分析対象区間に含まれる交差点数や信号制御の優先度を考慮して、所要時間の分布特性について分析・考察を進めることとする。

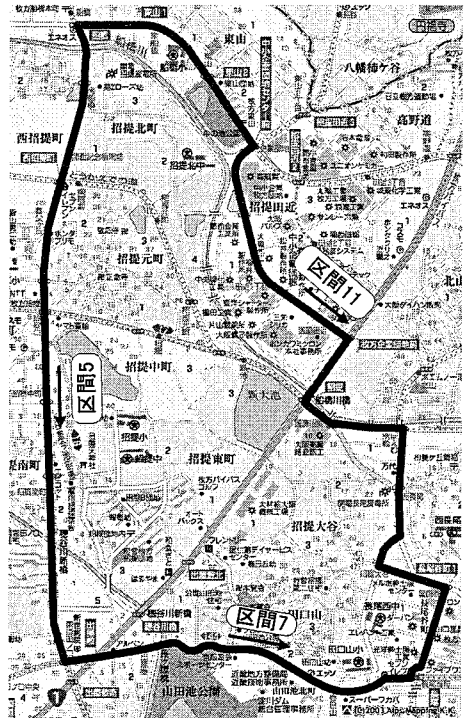


図-8 分析対象経路の位置関係

表-4 分析対象経路の距離と所要時間特性

| 区間      | 区間長(km) | 所要時間分布(秒) |      |
|---------|---------|-----------|------|
|         |         | 平均        | 標準偏差 |
| 区間11    | 4.21    | 780       | 92   |
| 区間5+区間7 | 4.33    | 798       | 197  |

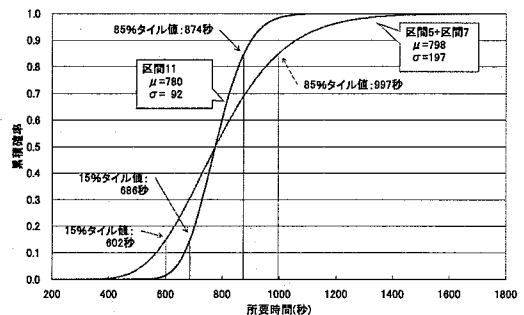


図-9 対数正規分布を仮定した場合の所要時間分布

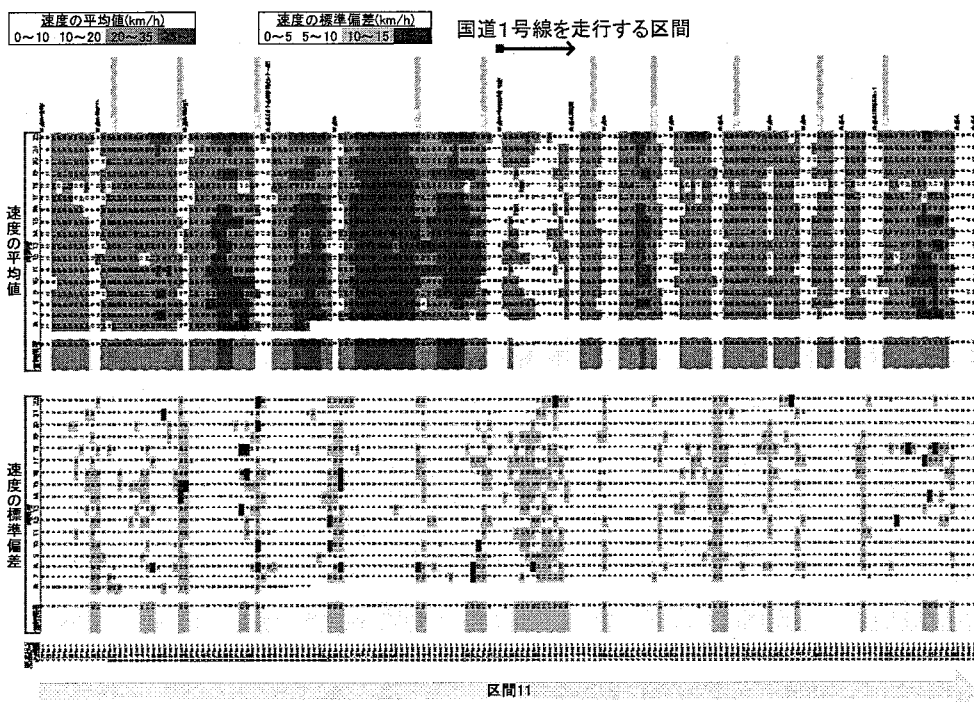


図-10(a) 走行速度の平均値・標準偏差の時空間変動（経路A：区間11）

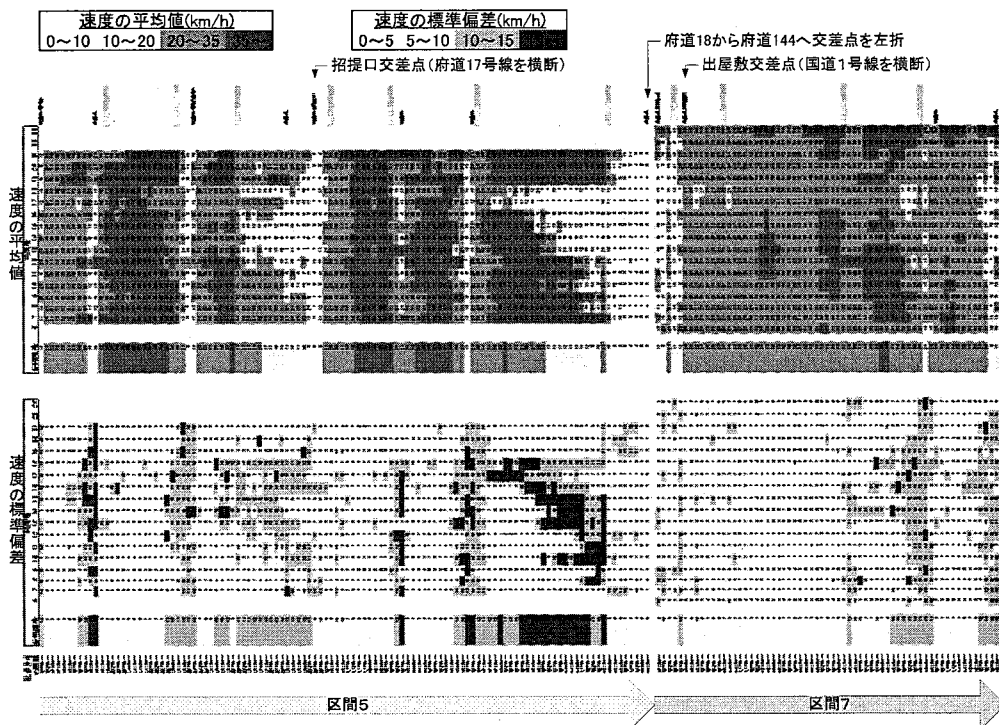


図-10(b) 走行速度の平均値・標準偏差の時空間変動（経路B：区間5+区間7）

## (2) 速度の時空間変動に基づく経路特性の分析

上記の所要時間特性の相違が、どのような要因から生じているかという点について考察してみる。バスプローブ

データの利用により、道路上の交通状態の変動のより詳細な把握も可能である。ここでは走行速度の平均値および標準偏差の時空間変動に基づき、前述の2経路間の所

所要時間信頼性の差異が生じた要因について考察する。バスプローブから得られる速度データを、進行方向に対して25m単位、時間に関しては1時間を単位として集計し、走行速度の平均値および標準偏差を求めた結果を用いる。

図-10 に走行速度の平均値・標準偏差の時空間変動を示す。(a)が経路A(区間11)の変動を、(b)が経路B(区間5+区間7)の変動を各々示している。各図の upper 段が速度の平均値を、下段が標準偏差を表しており、縦軸が時刻(1時間単位)、横軸がバスの進行方向に対応している。平均速度に関しては各セルの色が濃い場合は平均速度が高いことを意味し、色が薄い場合は平均速度が低いことを意味する。標準偏差に関しては、色の濃い場合には値が高い(変動が大きい)ことを意味し、色が薄い場合は標準偏差が小さいことを意味する。

図-10(a)(b)を比較すると経路B(区間5+区間7)の方が、時間帯によって速度低下が顕著に生じる箇所が多く存在していることが分かる。具体的には出屋敷・招提口の2交差点での速度変動が、当該経路の所要時間信頼性の低下につながる可能性が高いと考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、バスプローブデータの利用を前提として、所要時間信頼性の観点から道路ネットワークを評価するための方法論を提案した。具体的には、バス停止に伴う遅れ時間を除去し、一般交通の所要時間に近づけるためのデータ補正方法、ならびに、バス路線ネットワーク上に存在する任意のOD間経路の所要時間分布の推定を目的とした所要時間分布の合成方法を提案した。 $\chi^2$ 検定の結果を踏まえて、補正後の所要時間分布は対数正規分布に適合すると仮定し、ケーススタディとして2地点間を結ぶ異なる2経路の所要時間分布を求めた。そして所要時間信頼性の観点から各経路の特性について考察した。この結果からも、本研究で提案した方法論は初歩的な段階のものではあるが、所要時間信頼に基づく道路ネットワーク評価のために有用であると判断される。

本研究の今後の課題として、次の4つを挙げておく。

- (1) 各バス路線のターミナル駅周辺でのGPSの測位精度低下の影響を排除した上で、所要時間分布の特性について、経路長・信号交差点数等の道路要因、ならびに、曜日・時間帯等の時間的要因を考慮しつつさらに分析

を進める。とりわけ一般道路においては、所要時間増の主因の一つとして、信号交差点での遅れ時間を挙げることができる。このため、交差点の数ならびに信号制御の優先度等を考慮し、所要時間の分布特性について分析・考察を行うことが望まれる。

- (2) ある距離を有する経路等の所要時間分布を表現する上で適した理論分布について、更に検討を深めていく。とりわけ、複数区間の合成という観点からは中心極限定理の適用を視野に入れ、正規分布への適合性についても検討してみる。
- (3) 本研究で示した適用事例では、経路の所要時間信頼性評価のレベルにとどまっており、今後ネットワークとしてのサービス水準評価の方法論に展開していく。
- (4) バスプローブデータに加えて、常時観測されている交通量データ、道路構造面の特性データ等もあわせて用いて、道路ネットワークのサービス水準評価・診断システムの構築を目指す。

謝辞：本研究を遂行するにあたっては、新都市社会技術融合創造研究会、国土交通省近畿地方整備局および京阪バス株式会社より多大なるご支援を頂いた。ここに記して感謝する。

### 【参考文献】

- 1) Iida, Y.: Basic Concepts and Future Directions of Road Network Reliability Analysis, Journal of Advanced Transportation Vol. 33, No.2, pp.125-134, 2002.
- 2) 田中利行・佐藤弘子・中嶋康博・牧村和彦：プローブカーを用いたリアルタイム道路交通情報提供システムに関する研究, 第22回交通工学研究発表会論文報告集 pp101-104, 2001.9
- 3) 田宮佳代子・瀬尾卓也：プローブカーデータを活用した都市内一般道路のQ-V特性について, 土木計画学研究・講演集 Vol.25, 156, 2002.6
- 4) 高橋尚人・宮本修司・林華奈子・浅野基樹：プローブカーを利用した札幌市における冬季の平均旅行速度変化に関する分析, 土木学会第58回年次学術講演会講演集 IV-219, 2003.9
- 5) 牧村和彦・坂井康一：プローブデータを用いた渋滞損失量の数値化に関する基礎的研究, 土木計画学研究・講演集 Vol.27, XI-254, 2003.6
- 6) 堀口良太・清水行晴・金崎貴文・岡村明彦・上田憲道・杉崎康弘：プローブデータのクレンジング処理と車種別の運行特性分析, 土木計画学研究・講演集 Vol.26, 294, 2002.11
- 7) 上杉友一, 井料隆雅, 小根山裕之, 堀口良太, 桑原雅夫：断片的なプローブ軌跡の接合による区間旅行時間の期待値と分散の推定, 土木計画学研究・講演集, Vol.26, 2002
- 8) 田村博司, 永廣悠介, 宇野伸宏, 飯田恭敬：プローブデータを用いたバス運行状況の評価と道路交通特性の影響分析, 第4回ITSシンポジウム2005 Proceedings, pp.331-336, 2005.

---

## バスプローブデータを利用した所要時間信頼性評価手法の構築

宇野伸宏・永廣悠介・飯田恭敬・田村博司・中川真治

社会経済活動の高度化に伴い道路交通システムに対しても、より効率的で安定的な交通サービスの供給が求められている。本研究ではバスプローブデータを有効活用して、所要時間信頼性の観点から道路ネットワークのサービス水準を評価するための方法論の構築を目指している。ここではバスプローブデータより得られた、所要時間分布の補正法ならびに所要時間分布の合成手法を提案した。ケーススタディの結果より、実測所要時間分布は対数正規分布に適合する可能性が高いことが分かった。加えて、所要時間分布の合成手法は、対象ネットワーク内の同一 OD を結ぶ経路の特性を、所要時間信頼性の観点から評価する上で有用であることが示された。

---

## Evaluation Method of Travel Time Reliability Using Bus Probe Data

By Nobuhiro UNO, Yusuke NAGAHIRO, Yasunori IIDA, Hiroshi TAMURA, Shinji NAKAGAWA

Because of intensive progress in socioeconomic activities, the road system is required to provide efficient and stable transportation service. This study is aimed at constructing a methodology to evaluate the level of service of road network using bus probe data from the viewpoint of travel time reliability. This study proposes the approaches both to correct travel time obtained from bus probe survey and to synthesize multiple distributions of travel time into a distribution. Some case studies suggest that the approaches above might be useful to evaluate characteristics of routes connecting an OD pair from the viewpoint of travel time reliability.

---