

プローブデータを用いた エリアレベルでの旅行時間信頼性評価

水口 正教¹・日下部 貴彦²・福田 大輔³・朝倉 康夫⁴

¹学生非会員 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)

E-mail: m.mizuguchi@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京大学講師 空間情報科学研究センター (〒 277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

E-mail: t.kusakabe@csis.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)

E-mail: fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

⁴正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)

E-mail: asakura@plan.cv.titech.ac.jp

これまでの道路の旅行時間信頼性評価の多くは、観測データ数の確保が容易な単一の区間を対象としたものであった。一方近年、ETC2.0 プローブデータや民間商用車プローブデータのように、広域道路ネットワーク内の旅行時間変動の長期間把握を可能とする観測系が充実しつつあり、従来の線単位での評価から一般的な時間空間領域 (e.g. 面単位) での旅行時間信頼性評価への一般化が期待される。本研究では、Edie (1963) による交通状態を表す諸量の一般的定義に基づいて、任意の時間空間領域で車両の走行軌跡データを集計して得られる総走行距離・時間の統計値よりエリアレベルで旅行時間信頼性指標を算出する方法を提案した。また、ETC2.0 プローブデータを想定した仮想データに対して本手法を適用し (エリアレベル, コリドーレベルでの試算), その妥当性について考察した。

Key Words: Travel time reliability, Network level evaluation, Probe data

1. はじめに

従来の道路プロジェクトの事業評価では、速度、旅行時間、一般化費用などといった諸量の代表値 (多くは平均値) が用いられることが一般的であった。しかし平均的なサービス水準が同一の道路でも、旅行時間の変動が大きい路線と小さい路線とでは、道路のパフォーマンスは大きく異なる。旅行時間のばらつきが大きい路線を利用する場合、ばらつきの小さい道路を利用する場合に比べて、ドライバーは遅延時間を考慮したうえで余裕をもって出発する必要があるが、これはドライバーにとって機会費用となる。このような旅行時間変動の少ない交通サービスを提供する性能は旅行時間信頼性と呼ばれ、旅行時間の平均値に基づく評価に加えて、道路の質を評価する上で重要な評価指標となりうる。

旅行時間信頼性に関する既往の研究は、観測技術の問題等から、リンクレベルあるいはルートレベルでの研究が中心的に行われてきた。例えば Lyman and Bertini¹⁾ は、車両感知器データを用いてアメリカオレゴン州のポートランドの高速道路特定区間を対象とした信頼性評価を行い、旅行時間の 95%tile 値、旅行時間インデッ

クス (TTI), バッファインデックス (BI), プランニングタイムインデックス (PTI), 混雑頻度等を算出している。また山崎ら²⁾ は、名神高速道路における約 1 年間分の ETC データを用いて旅行時間信頼性評価を算出し、それを用いた高速道路サービスの質の分析を行っている。このように、これまでの道路の旅行時間信頼性評価の多くは、旅行時間分布を高い精度で推定するために必要な観測データ数の確保が容易な単一の区間を対象としたオーソドックスな分析が中心であった。しかしながら、ルート・リンクレベルでの分析では、広域な道路ネットワークのうちの局所部分の評価しか行うことができず、面的な施策 (流入規制やコードンプライシング) 等を行った場合に当該地域全体の旅行時間信頼性がどのように変化するかを評価することは難しい。

感知器や ETC のように固定されたセンサーインフラからのデータを用いてエリア全体の旅行時間信頼性評価を行うには、その整備密度の低さなどから限界があった。一方、ネットワークレベルでの広域な交通状態の推定を行うにあたってはプローブデータの活用が第一に考えられてきたものの、そのカバー率の低さが指摘されてきた。また、プローブデータを用いて旅行時間信

信頼性評価を行うにあたっては、プローブデータのマップマッチング作業が必須であった。しかし近年、ETC2.0 プローブデータや民間商用車プローブデータのように、広域道路ネットワークにおける旅行時間の変動を長期間にわたって詳細に把握することを可能とする観測系が充実しつつある。それらの情報を適切に集計・解析することで、従来の線単位での評価から一般的な時間空間領域 (e.g. 面単位) での旅行時間信頼性評価を行うことへ展開できるものと期待される。その際、膨大なプローブ情報の利用を念頭に置くと、必ずしもマップマッチング作業を必要としない、効率的な旅行時間信頼性の評価手法の構築が新たに必要とされる。

以上の問題意識のもと、本研究では、広域かつ長期で観測されるプローブ情報の利用を前提としてエリア全体の旅行時間信頼性を評価する方法について検討する。具体的には、Edie³⁾ による交通状態を表す諸量の一般的定義に基づいて、任意の時間空間領域で個別車両の走行軌跡データを集計して得られる総走行距離及び総走行時間の統計値よりエリアレベルで旅行時間信頼性指標を算出する方法を提案する。次に、ETC2.0 プローブデータを想定して作成した仮想プローブデータに対して本手法を適用し (エリアレベル、及び、コリドーレベルでの試算)、その妥当性についての考察を行う。

2. エリアレベルでの旅行時間信頼性指標の提案

(1) Edie による交通状態の一般的定義

対象区間が単路区間である場合、走行軌跡と集計領域は図-1のように示すことができる。ここで、着目している集計領域 (時間空間セル) A の中をプローブカー i (図-1の赤線でその移動軌跡を表す) が移動した距離とそれに要する時間をそれぞれ d_i , t_i と記す。すると、特定のプローブ車両の平均旅行速度 v_i は以下の式 (1) で

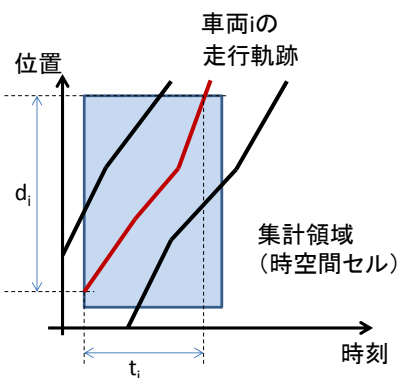


図-1 走行軌跡と集計領域

与えられる。

$$v_i = d_i / t_i \quad (1)$$

この領域で観測されたすべてのプローブカーについて距離と時間を集計すると、総走行距離 D (台 km)、総旅行時間 T (台時) は以下の式 (2), (3) によって与えられる。

$$D(A) = \sum_{i \in A} d_i \quad (2)$$

$$T(A) = \sum_{i \in A} t_i \quad (3)$$

特に対象集計領域が矩形の場合、その空間的な長さ (単路区間長) を L 、時間的な長さを H とすれば、集計領域の大きさ $|A|$ (km 時間) は以下の式 (4) によって表される。

$$|A| = L \cdot H \quad (4)$$

これらの諸量から、Edie の定義に従って、集計領域内でのプローブカーの速度 (V)、密度 (K)、交通量 (Q) を次式により求めることができる。

$$V(A) = \frac{D(A)}{T(A)}$$

$$K(A) = \frac{T(A)}{|A|}$$

$$Q(A) = \frac{D(A)}{|A|}$$

もし領域内を通過するすべての車両がプローブカーであれば、これらの諸量は領域内の交通状態と完全に一致する。しかし、一般にプローブカーは全車両の一部であるので、これらの諸量を集計領域の交通状態とすることには問題がある。もし、プローブカーが全車両の中に一様に存在するとみなすことができ、その混入率 (μ) が既知であれば、集計領域の交通状態は式 (5) によって推定することができる。

$$\hat{V}(A) = \frac{D(A)}{T(A)}$$

$$\hat{K}(A) = \frac{T(A)}{\mu|A|}$$

$$\hat{Q}(A) = \frac{D(A)}{\mu|A|}$$

(5)

(2) エリアレベルでの旅行時間信頼性評価

式 (5) のうち、混入率にかかわらず交通状態を表現できるのは、速度 (V) である。また、速度の逆数 ($1/V = T/D$) は、単位距離あたりの平均旅行時間 (h/km) であり、これもプローブの混入率が未知でも領域の交通状態を表現する変量として用いることができる。集計領域の時間の長さは任意に取ることができ、平均速度 (V) や単位距離あたり平均旅行時間 ($1/V$) についても、ピーク時のみ、1時間単位、日単位など、任意の時間集計単位毎に求めることができる。

なお、集計領域 A は単路区間や矩形領域である必要はない。図-2 はある空間領域 (行政区界等) を移動し

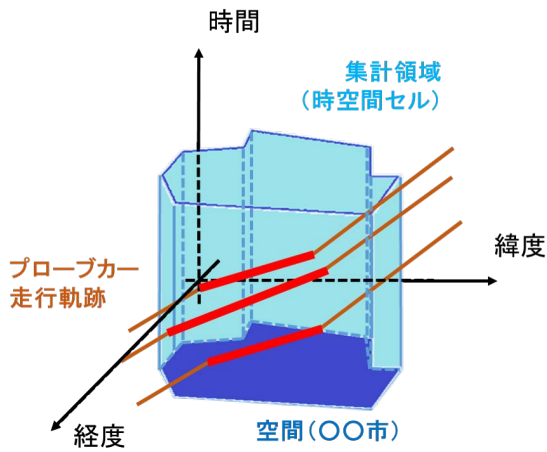


図-2 任意の時空間領域を対象としたプローブデータの集計イメージ

たプローブカーの走行軌跡図のイメージである。単路の場合と同様に、着目している集計領域（平面×時間の3次元の時空間セル）を移動したすべてのプローブカー（図-2の赤線）の総移動距離と総移動時間から、領域の平均速度や単位距離当たり平均旅行時間を求めることができる。

このように、集計領域は任意の形状を取ることが可能であるため、例えば、行政区界を境界としてそのエリアの交通状態量を求めることも可能であるし、特定の道路区間や路線を対象として集計することも可能である。あるいは、ある高速道路の隣接するインターチェンジ間といった特定区間（コリドー）を対象として集計を行うことも可能である。なお、マップマッチングされていない場合に特定の道路区間での集計を行う場合には、一定の幅を持たせた帯状の空間を用意して、その領域を通過するプローブ車両を集計することになるが、帯の幅が広い場合には、帯状の空間を主方向に対して横断する方向に通過するプローブ車両が集計量に影響することなどに注意しなければならない（図-3）。

(3) 実際の適用にあたっての工夫

分析対象である時空間領域は一般に不定形状になるが、そのような時空間領域の交通状態量を集計する際には、その都度、領域を指定して、領域を通過するプローブ軌跡を集計することになる。しかし、集計領域の大きさや形を変えながら集計する場合や、複数の領域で集計量を比較したい場合には、領域の定義をその都度行いつつ集計するのは効率的ではない。そこで、不定形の空間を定型の小領域、具体的には標準地域メッシュの3次メッシュ(1km 四方)の集合体とみなし、まず、メッシュの交通状態量を求めて、それを集計するこ

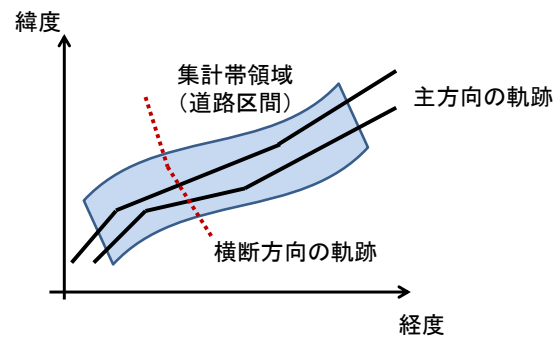


図-3 帯状の領域での集計イメージ

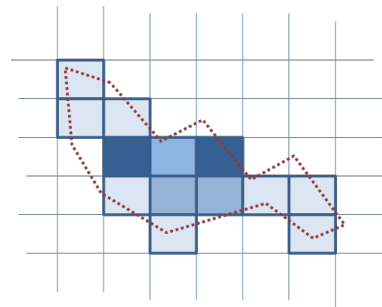


図-4 メッシュベースでの領域構築イメージ

とによる任意の形状の空間領域の状態量の算出を行うことを考える（図-4）。

また、メッシュからの集計は、空間方向だけではなく、時間方向についても同様である。具体的には、小さな単位時間（本研究では1時間単位）において、メッシュ（時間方向にも大きさを持つ立方体）ごとに交通状態量を求め、それを必要な時間単位に再集計するという考え方を採用することができる。

このようにして作成した時空間領域に対し、式(2)~(5)によって日々の単位距離当たり旅行時間を長期間にわたって算出する。そして、それらの各種統計値(平均値、標準偏差、最小値、25%tile値、中央値、75%tile値、最大値)を算出することにより、当該エリアの旅行時間信頼性評価指標とする。

3. 仮想 ETC2.0 プローブデータの概要

本研究では、近い将来に ETC2.0 プローブ車両が普及する状況を念頭に置いて、提案手法に関するケーススタディーを行う。現時点では ETC2.0 の普及率は低いことから、今回は民間プローブデータを基にして、定点に設置されている ITS スポットでデータが収集されるという ETC2.0 の特徴を反映した仮想データを作成した上で、分析用の仮想データを作成した。

仮想データのベースとなる民間プローブデータは、主

に商用車に搭載されている GPS 付デジタルタコグラフによって全国で収集された 1 秒毎の位置 (緯度・経度) データである。なお、このデータでは、各車両のトリップの実際の起点と終点は秘匿処理により把握することはできないため、秘匿処理後の起終点を実際の起終点と見なして仮想データを作成する。

仮想データの作成では、図-5 の範囲を対象とした。民間プローブデータに含まれる車両について、図-5 の外枠の処理対象エリア内に設置されている ITS スポット (図-6、一般道路上の経路情報収集装置も含む) を通過 (20m に接近) した場合のみデータの収集が可能であったとみなして処理を行った。具体的には、民間プローブデータに含まれる車両が ITS スポットの 20m に接近したことを通過として検知し、その地点より前に通過した ITS スポットまでのデータ又は過去 80km のデータのうちどちらか短い方のデータを抽出した。さらにこれらデータのうち、出力対象エリア内 (図-5 赤枠内) のデータを抽出したものを分析用の仮想データとした。

データの期間は 2014 年 10 月から 12 月の 3 か月間であり、本研究ではそのうちの平日 59 日間を対象として分析を行う。また、1 日を 24 個の時間帯に分け、その時間帯ごとに単位距離当たりの旅行時間を算出することで分析を行う。

4. ケーススタディの概要

本研究では、(1) エリアレベルの旅行時間信頼性評価、(2) コリドーレベルの時間信頼性評価という二つのケーススタディを行う。

(1) エリアレベル

エリアレベルの分析では、圏央道沿いの八王子市、町田市、相模原市 (中央区・南区)、大和市、さいたま市と、道路整備の進んでいると考えられる都心 3 区 (千代田区・中央区・港区) という、六つのエリアを対象とした比較分析を行う。それぞれのエリアの道路整備状況等に関する情報を表-1 に記す。

(2) コリドーレベル

コリドーレベルの分析で対象とする路線は、東名高速道路 (東京～海老名)、国道 246 号線 (用賀～厚木)、第三京浜道路・横浜新道、中央道・圏央道の 4 路線とする。図-7 にそれぞれの路線を示す。

それぞれの路線を含む抽出 3 次メッシュ数は、東名高速道路 (東京 IC～海老名 IC) : 149 個、国道 246 号線 (用賀～厚木) : 370 個、第三京浜・横浜新道 : 175 個、中央道・圏央道 : 265 個であった。

それぞれの路線について、2014 年秋季東名高速道路

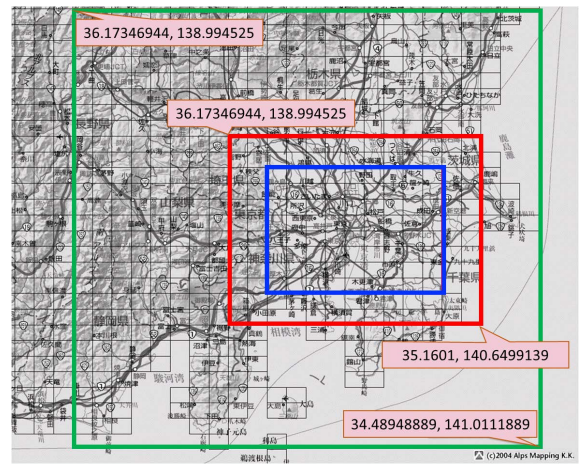


図-5 仮想 ETC2.0 プローブデータの作成範囲

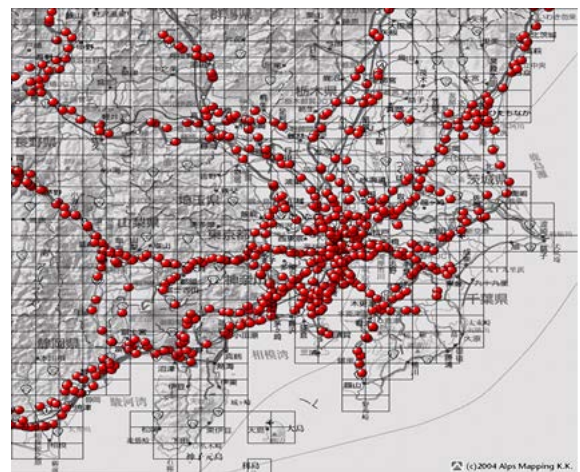


図-6 ITS スポットの配置図 (2015 年 10 月時点)

集中工事の影響を分析する。工事期間は 10 月 20 日～10 月 24 日、10 月 27 日～10 月 31 日、11 月 4 日～11 月 7 日の 3 回に分かれており、工事期間の 14 日間と、それ以外の通常の平日 45 日間に分けて分析を行うことで、時間信頼性の観点から東名集中工事が周辺路線に与える影響を分析する。

なお現時点では、それぞれの路線の含まれる 3 次メッシュ (コリドー) を基に分析対象領域を作成している。つまり、対象路線の交通だけではなく、横断方向の交通や、一般道路の交通データも含まれていることに注意する必要がある (図-3)。

5. 分析結果と考察

(1) エリアレベル

設定したエリアおよび期間内における時間帯別の単位時間当たりの旅行時間の各種統計量を算出した。その結果を箱ひげ図として図-8～図-13 に示す。八王子市・さいたま市では、どの時間帯も中央値・四分位範囲と

表-1 対象とする各エリアの諸元

地域	主要道路延長 (km)	細街路延長 (km)	面積 (km ²)	DID 地区面積 (km ²)	信号交差点	夜間人口 (人)
八王子市	336.5	1734.2	186.3	61.6	928	562,019
町田市	100.9	1198.5	71.6	44.5	514	426,648
相模原市	92.4	1414.5	75.0	55.8	551	722,174
大和市	47.4	574.4	27.1	23.4	219	234,154
さいたま市	471.5	3982.6	217.5	116.6	1610	1,277,812
都心 3 区	369.8	659.8	42.2	42.2	1376	439,060

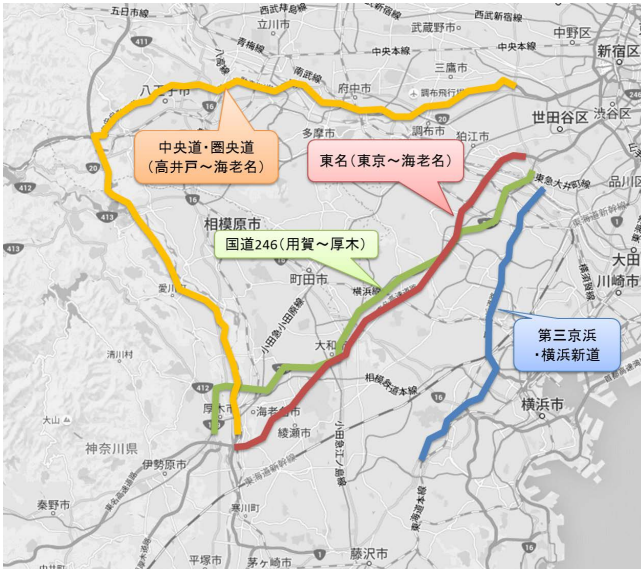


図-7 対象とするコリドー

も小さな値をとっており、旅行時間信頼性の観点からのパフォーマンスが高いことが分かった。それに対し、都心 3 区・町田市では特にピーク時間帯前後での中央値・四分位範囲が大きくなっており、時間信頼性が低くなっていることが分かる。中央値の大きくなるピーク時間帯については、基本的には 7 時~8 時台だが、都心 3 区では 9 時~11 時台で中央値が大きくなっている。また、朝夕ピークを比較すると、町田市では朝ピークが、都心 3 区では夕ピークがもう一方のピークに比べ大きくなっていることが分かった。大和市では、夜間の標準偏差が大きくなる結果となった。

但し、大和市での標準偏差や、都心 3 区でのピーク時間帯等、直感とはややとかけ離れた結果も見られた。これらの原因を特定するためには、各メッシュにおける時間信頼性を算出し、原因となっている区域を特定することが必要と考えられる。

次に、時間帯別の単位距離当たり平均値と単位距離当たり標準偏差の時間推移をエリア比較したものを図-14 に示す。これをもとに作成した単位距離当たり平均・単位距離当たり標準偏差プロットを図-15 に示す。図-

15 から、まず平均値が増加していき、その影響が次の時間帯に波及していくことで標準偏差の値が追いつけるように増加するという、反時計回りのグラフが描かれた。これは単路区間でも確認されている現象^{4)~7)}であり、同様の現象がエリアレベルの旅行時間信頼性評価を行った際にも生じていることが確認できた。

(2) 路線レベル

東名高速道路集中工事期間中とそれ以外の通常の平日における、時間帯別の単位時間当たり旅行時間の各種統計量を算出した。工事の影響を評価するために、図-16~図-19 に単位距離当たり平均値と単位距離当たり標準偏差の工事期間中と平常時での差分を示す。東名高速道路、国道 246 号線についてはほとんどの時間帯で平均値、標準偏差ともに増加する結果となった。第三京浜・横浜新道では、夜~昼の時間帯では大きな変化は見られなかったが、昼~夜の時間帯では平均値が低下し、工事期間の方が速達性が向上する結果となった。標準偏差に関しても半分以上の時間帯で低下する結果となった。東名高速道路に交差するように位置している圏央道・中央道については、ほとんどの時間帯で平均値・標準偏差ともに低下する結果となった。特にピーク時間帯の標準偏差は大きく低下していることが分かる。

東名高速道路・国道 246 号線では、工事によって東名高速道路の容量が低下することで時間信頼性が低下し、国道 246 号線をその大体経路として利用することが考えられるが、分析結果ではどちらの経路もパフォーマンスが低下しており、その変化をとらえられた結果となった。第三京浜・横浜新道、圏央道中央道では、パフォーマンスが向上する結果となったが、これは対象路線以外の交通も含まれており、それらの影響も含まれている可能性が考えられる。より詳細な分析を行うためには、エリアレベルの分析と同様に、メッシュごとに単位時間当たりの旅行時間を算出し、変化の要因となっている部分を特定する必要があると考えられる。

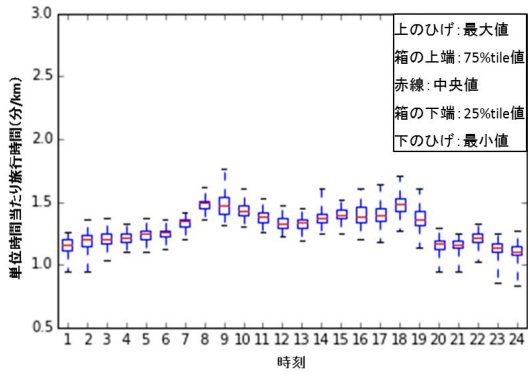


図-8 八王子市 箱ひげ図

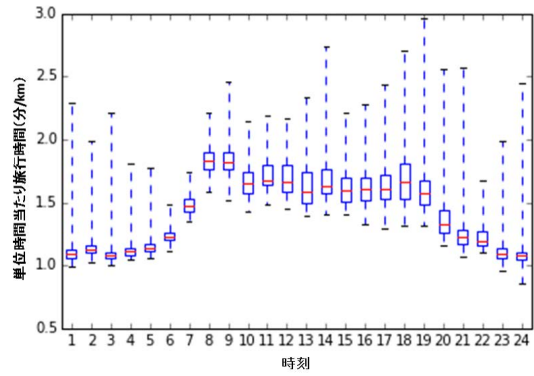


図-11 大和市 箱ひげ図

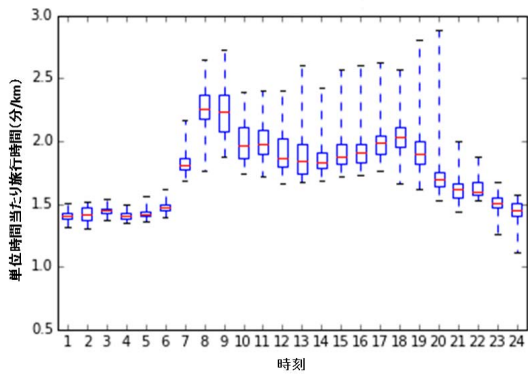


図-9 町田市 箱ひげ図

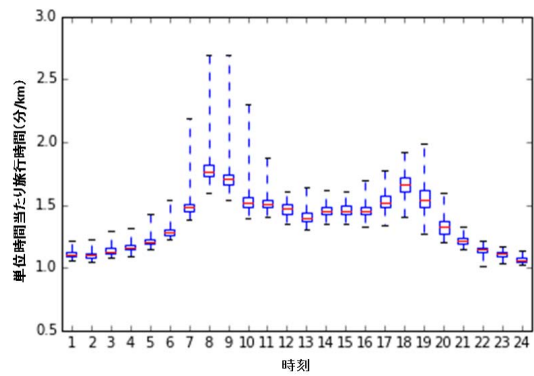


図-12 さいたま市 箱ひげ図

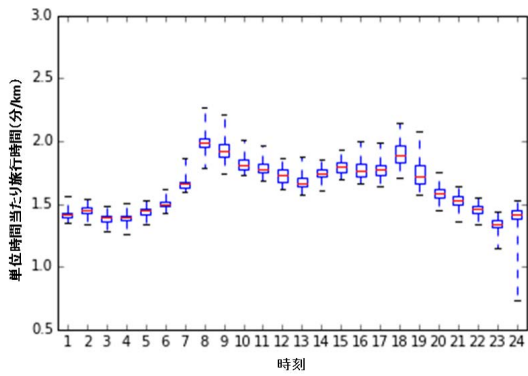


図-10 相模原市 箱ひげ図

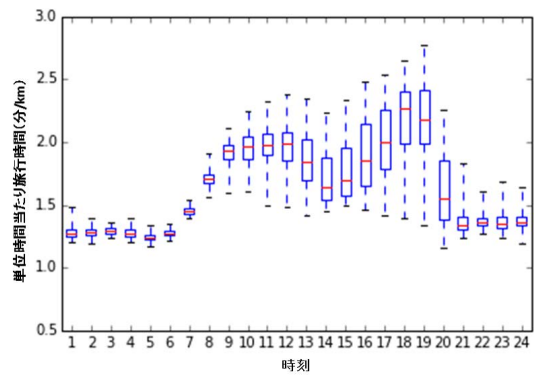


図-13 都心3区 箱ひげ図

6. おわりに

(1) 本研究の成果

本研究では、ネットワークレベルでの旅行時間信頼性を評価するための指標を提案した上で、民間プローブデータを基に作成した仮想 ETC2.0 データを用いたケーススタディーを行った。本研究で提案された時間信頼性評価指標は、マップマッチング処理を前提とせずにプローブデータの詳細な情報を活用できるものであり、どのようなプローブデータに対しても適用が可

能である。また、複数の市区におけるエリアレベルの分析、及び、複数路線におけるコリドーレベルのケーススタディーを通じて、算出された旅行時間信頼性評価指標に一定程度の妥当性があることも確認された。

まず、エリアレベルの分析では、エリアごとに旅行時間信頼性の低い時間帯や高い時間帯に特徴があることが示された。また分析結果から、道路整備の状況と道路ネットワークのパフォーマンスが必ずしも直結しないことが示唆された。

一方路コリドーレベルの分析では、複数路線に対し、

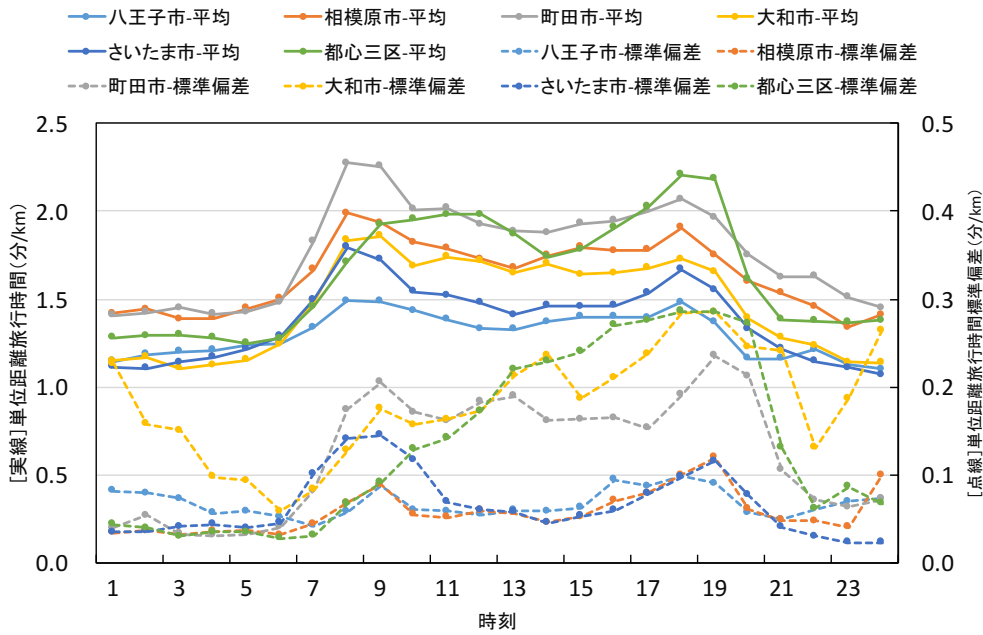


図-14 単位距離当たり平均値と単位距離当たり標準偏差の時間推移

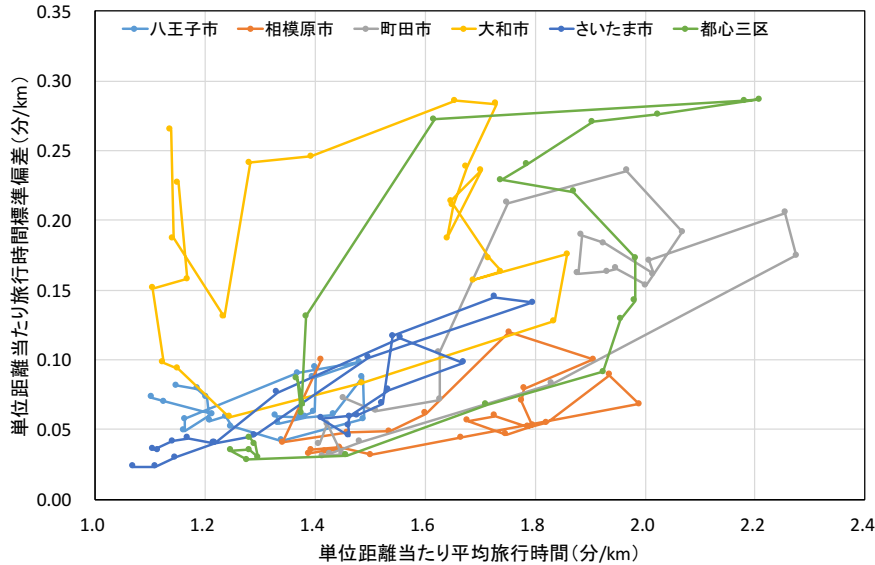


図-15 単位距離当たり平均値-単位距離当たり標準偏差プロット

東名高速道路集中工事期間とそれ以外の期間で旅行時間信頼性の比較を行った。東名高速道路・国道 246 号線における分析結果では、工事期間中の旅行時間信頼性が低下している結果となった。このことから、工事によって東名高速道路の容量が低下し、時間信頼性が低下することで、国道 246 号線をその代替経路として利用している可能性が示唆された。

(2) 今後の課題

本研究では、パフォーマンスが低下している領域や時間帯を知ることができたが、その原因や理由までは明らかにできていない。今後の課題として、より詳細

な分析をするため、例えばエリア内車両存在台数と旅行時間信頼性の関係を分析する必要があると考えられる。また、各メッシュごとの旅行時間信頼性や車両存在台数を分析することで、渋滞等でパフォーマンスが低下する原因となっている領域を把握する必要がある。

なお、Tu らの一連の研究^{8),9)}では、高速道路における車両感知器データを用いて、オランダ南西部の高速道路ネットワークでの Macroscopic Travel Time Reliability Diagrams と呼ばれる旅行時間信頼性と車両存在台数の関係を示しているが、本研究で提案した手法を用いて、Tu らの研究を高速道路から一般道路を含む包括的なものへ拡張することも考えられる。

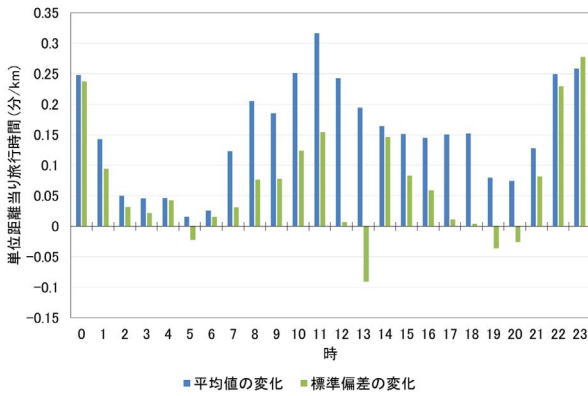


図-16 東名高速道路 分析結果

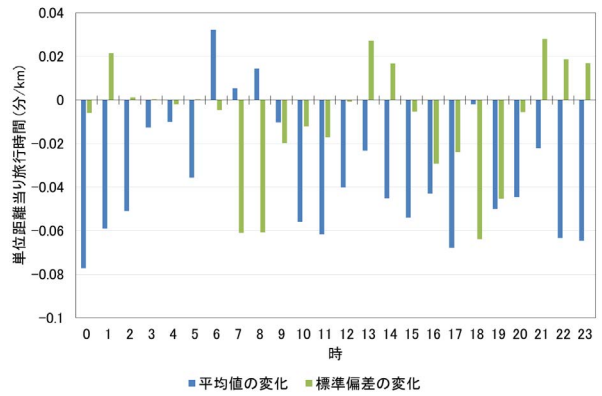


図-19 圏央道・中央道 分析結果

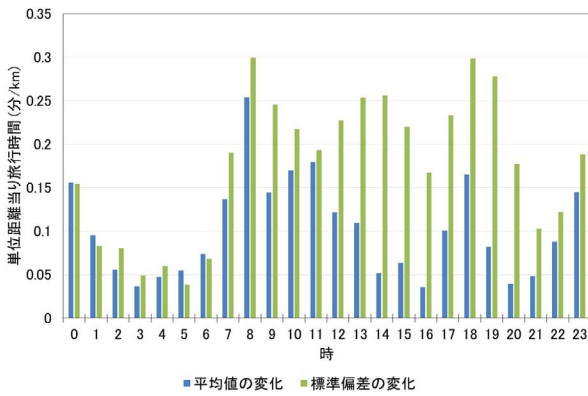


図-17 国道 246 号線 分析結果

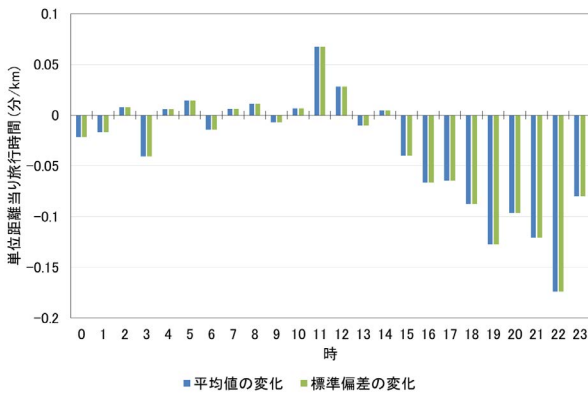


図-18 第三京浜・横浜新道 分析結果

operations, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2046, pp. 1–10, 2008.

- 2) 山崎浩気, 宇野伸宏, 倉内文孝, 嶋本寛, 小笹浩司, 成田博: ETC データを用いた都市間高速道路の旅行時間信頼性評価に関する研究, *土木計画学研究・論文集*, Vol. 25, pp. 935–945, 2008.
- 3) Edie, L.: Discussion of traffic stream measurements and definitions, In Alomond, J. ed. *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, pp. 139–154, 1963.
- 4) Fosgerau, M. and Karlström, A.: The value of reliability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 44, No. 1, pp. 38–49, 2010.
- 5) Fosgerau, M.: On the relation between the mean and variance of delay in dynamic queues with random capacity and demand, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 34, No. 4, pp. 598–603, 2010.
- 6) Fosgerau, M. and Fukuda, D.: Valuing travel time variability: Characteristics of the travel time distribution on an urban road, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 24, pp. 83–101, 2012.
- 7) 福田大輔: 旅行時間変動に起因するドライバーの移動コストの試算, 中山晶一朗, 朝倉康夫 (編) 道路交通の信頼性評価, コロナ社, 第 14 章, pp. 227–245, 2014.
- 8) Tu, H., Li, H., Van Lint, H. and van Zuylen, H.: Modeling travel time reliability of freeways using risk assessment techniques, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 46, No. 10, pp. 1528–1540, 2012.
- 9) Tu, H., Li, H., Van Lint, H., Knoop, V. and Sun, L.: Macroscopic travel time reliability diagrams for freeway networks, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2396, pp. 19–27, 2013.

(2016. 7. 31 受付)

謝辞: 本研究は一般社団法人交通工学研究会受託研究「ETC2.0 プローブデータの信頼性評価手法に関する検討業務 (業務委託機関: 一般財団法人 ITS サービス高度化機構)」の一環として行われた。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Lyman, K. and Bertini, R.: Using travel time reliability measures to improve regional transportation planning and