

効率的な交通情報提供サービスのための タクシープローブ配備計画手法の理論と実証

堀口 良太

株式会社アイ・トランスポート・ラボ

〒162-0824 東京都新宿区揚場町 2-12-404, Tel/Fax: 03-5261-3077, E-mail: horiguchi@i-transportlab.jp

本研究は、提供したいサービスを効率的に実現するために、何台のプローブをどのように配備すべきかという課題に、理論的・実証的に取り組むものである。本文では、まず情報提供サービスの質を代表する指標として、リンクカバー率を定義する。次に、運用を考えた場合に最も効率的にデータが得られると期待されるタクシーをプローブとする場合の、エリア別の配備台数とリンクカバー率の関係について理論的に考察する。また、トリップ原単位とリンク利用特性係数という指標を導入し、配備計画台数から期待されるリンクカバー率を簡易に推計する手法を提案するとともに、その手法の汎用性や効率的な配備戦略について考察する。最後に、平成12年度と13年度に横浜地域で実施されたプローブ実験で得られたデータを用い、ここで提案する方法論の有効性を実証的に検証する。(<<http://www.i-transportlab.jp/publications/papers>>にてPDFを掲載)

Strategic Disposition of Taxi Probe to Accomplish Effective Data Collection for Travel Information Provision - A Theoretical Framework and Its Practice

Ryota HORIGUCHI

i-Transport Lab. Co., Ltd.

2-12-404 Ageba-cho, Shinjuku, Tokyo 162-0824, Japan. Phone&Fax: +81-3-5261-3077. E-mail: horiguchi@i-transportlab.jp

This research proposes a theoretical framework to estimate the update frequency of link travel information obtained by probe data collection system. The theoretical framework provided here may give an answer to the question "how many probes do we need to accomplish the information provision service?" Furthermore, some strategic aspects of the disposition of taxi probes are also considered. At the end of this paper, the theoretical approach here is validated with the real probe data collected through the IPCar Project in Yokohama-city, in 2000 and 2001.

Keyword: Probe, Data collection, Information provision, Taxi

1. 研究の背景と目的

本研究では、「提供したいサービスを効率的に実現するためには、何台のプローブをどのように配備すればよいのか」という課題に、理論的・実証的に取り組む。

道路交通法改正に伴う規制緩和により、交通情報提供ビジネスへの民間参入が耳目を集めている。プローブ車両による情報収集は、民間が自前で運用できる観測手段として、またこれまでの道路交通センサや道路サービス水準の評価のあり方を変える新たな調査手法として、官民でその有効性を確認するための実験プ

ロジェクトが数多く実施されている。

多数のプローブ車両を用いて情報を収集しようとするならば、機器の整備に要する初期コストのみならず、データを収集するための運用コストが増加する。従って、より少ない数のプローブで目的を達成できる量のデータが収集できる体制を、事前に計画できる方法論が強く求められている。

以降では、まず情報提供サービスの質を代表する指標として、リンクカバー率を定義する。次に、運用を考えた場合に最も効率的にデータが得られると期待さ

れるタクシーをプローブとする場合の, エリア別の配備台数とリンクカバー率の関係について理論的に考察する. また, トリップ原単位とリンク利用特性係数という指標を導入し, 配備計画台数から期待されるリンクカバー率を簡易に推計する手法を提案するとともに, その手法の汎用性や効率的な配備戦略について考察する. 最後に, 平成12年度と13年度に横浜市域で実施されたプローブ実験(以下, IPCar12とIPCar13とする)で得られたデータ¹⁾を用い, ここで提案する方法論の有効性を実証的に検証する.

同様の目的で, 石田ら²⁾によって, 道路交通センサスでのプローブによる走行速度調査を実施する際に必要となるサンプル抽出率を検討した研究事例がある. しかしながら, 道路利用者全体から均一にプローブサンプルを抽出する前提のため, 戦略的な配備計画という視点での分析が含まれないこと, および交通量配分とモンテカルロシミュレーションを用いた検討手法のため, 必要抽出率の算定が少々煩雑であることなど, 本研究とは主旨を異にするものである.

2. リンクカバー率での情報提供サービス水準評価

議論の前に, ここで評価指標とするリンクカバー率について解説する.

一口に情報提供サービスといっても, 対象ユーザや利用するデータ処理技術が違えば, 収集情報に要求する品質が異なってくる. 情報の品質を決める要因には, その精度や信頼性などが挙げられるが, ここではプローブ配備台数と直接関連する情報更新頻度, すなわち「ある道路区間に着目したとき, どれくらいの間隔でプローブが通過して, 新たな情報を提供してくれるか」で情報の品質を代表させる.

たとえば, 道路整備や各種の交通運用策の渋滞緩和効果を, 事前と事後で定量評価するような, 道路・交通管理者向けのサービスを念頭に置く場合であれば, 評価対象区間の情報更新頻度が1~数時間に1回程度であっても, 長期間にわたって蓄積することにより, 月単位や平休別の評価は可能である³⁾. 一方, 一般利用者向けにリアルタイムでの旅行時間情報提供サービスを展開するには, 長くとも10~30分程度の間隔で情報が更新されることが期待されよう.

これらのサービスが利用者にとって満足のいく水準で提供されているかどうかを評価するには, 情報更新頻度に加えて「どれくらいの範囲で要求する情報更新頻度が満たされているか」という基準も考慮されなければならない. したがって, 一定の情報更新頻度を上回る道路区間の合計延長距離を空間的な範囲とみなし,

サービス対象地区の道路総延長距離に対する割合をリンクカバー率と定義し, 以降の議論に用いる.

3. リンクカバー率推計の理論的枠組み

3.1. タクシーの地区通過頻度とトリップ原単位

まず, タクシーの行動原則を「タクシーは空車で待機する拠点と, そこから乗車する利用客の目的地か, 拠点以外から拠点への移動を希望する利用客がいるところまで移動した後, 再度拠点に戻る」というものである. 実際に, 鉄道駅などで空車待ちをしているタクシーを考えれば, この仮定は自然であろう.

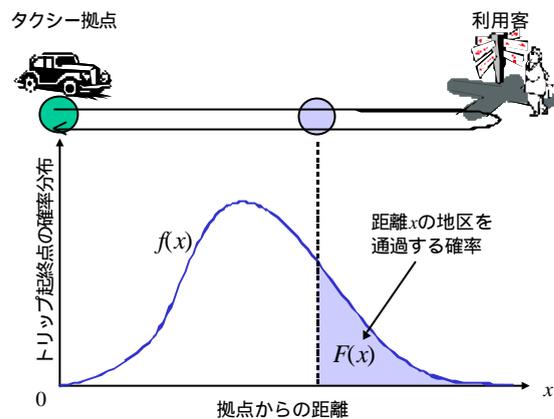


図1: タクシーの行動原則とトリップエンド分布

タクシーは一般には鉄道などの長距離移動モードを補完するモードであり, また利用料金の制約もあることから, 拠点からの距離 x に対するトリップエンドの分布確率は, 図1のような, ある距離帯にピークを持つ形状となる. この確率密度関数を $f(x)$ として表すとき, 拠点から x だけ離れた地区をタクシーが通過する確率 $F(x)$ は, x 以遠の地区がトリップエンドとなる確率を積分した値, すなわち(式1)となる.

$$F(x) = \int_x^{\infty} f(y) dy \quad (式1)$$

ここで, タクシー1台の単位時間あたりのトリップ数期待値, すなわちトリップ数原単位 k が与えられれば, n 台のタクシーをこの拠点に配備した場合に, 距離 x の地区を単位時間あたりに通過するトリップ数の期待値 $N(x)$ は次式のように求められる.

$$N(x) = nkF(x) \quad (式2)$$

3.2. 地区内リンク利用特性の偏向

(式 2)はタクシーがある範囲の地区を通過する頻度であり, その中に含まれるリンクの通過確率を表すものではない. 地区中のリンク利用確率は一様ではなく, ネットワーク形状とタクシートリップの方向との関係によって偏ってしまう. 図2はその概念図である. ある地区内のリンクについて, その利用確率ごとにリンク長で重み付けした頻度分布をとってみれば, タクシーが主として使う道路が多いほど, すなわち偏りが小さいほど, 緩やかな右下がりの曲線を示すことになる.

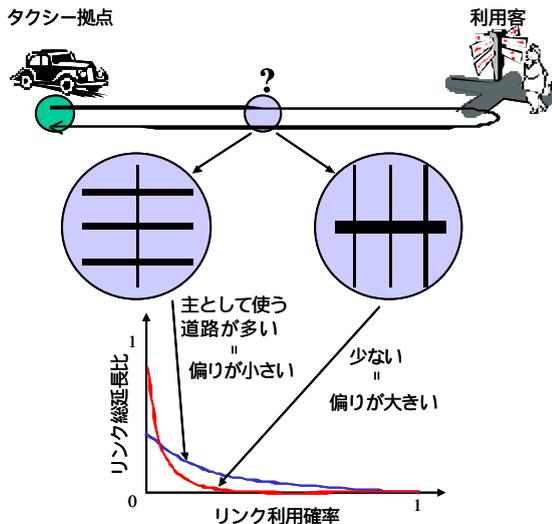


図2: ネットワーク形状とリンク利用率の偏向

この地区ごとのリンク利用確率 p と総延長比の関係を $g(p)$ とするとき, (式 3)を基本リンクカバー率 $g^*(p)$ とする. これは, リンク利用確率が p 以上の区間の総延長距離比率を意味しており, 図3のように示される.

$$g^*(p) = \int_p^1 g(q) dq \quad (式 3)$$

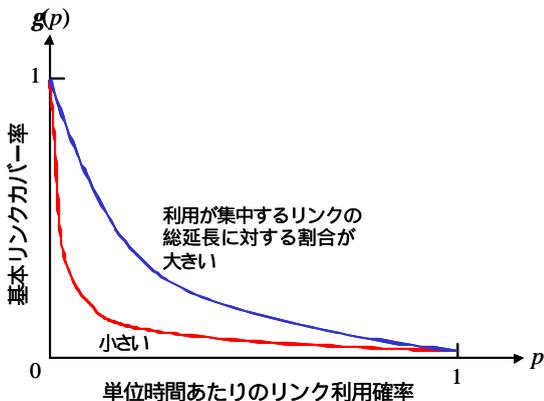


図3 基本リンクカバー率

3.3. タクシー配備台数とリンクカバー率

(式 2)の地区ごとのタクシー通過頻度期待値は, その地区内のリンクを通過するタクシートリップの最大数を与える. したがって (式 3)の基本リンクカバー率の横軸最大値をこれにあわせるように拡大すれば, タクシー n 台をプローブとして配備した場合の, 拠点からの距離が x の地区において, 情報更新頻度が I 以上のリンクカバー率 $g(I)$ を求めるものとなる. すなわち(式 4)である.

$$g(I, n, k, x) = g^*(I / nkF(x)) \quad (式 4)$$

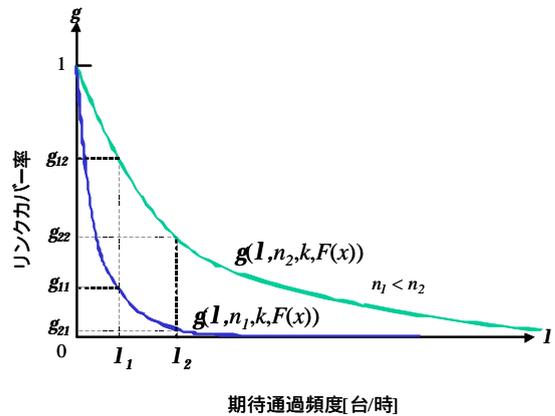


図4: タクシー配備台数とリンクカバー率の関係

図4は拠点から x だけ離れたある地区について, リンクカバー率が要求する情報更新頻度 I と, 配備するタクシープローブ台数 n によってどのように変化するかを示す概念図である. 図中の2つの曲線は, n の違いによって横軸方向に拡大縮小された関係にある. 図より, たとえばリアルタイム性を重視するため, サービスが求める情報更新頻度を大きく設定した場合 ($I_1 \sim I_2$), 投入台数が少ないほうのカバー率の変化 ($g_{11} \sim g_{21}$) のほうが, 多い方 ($g_{22} \sim g_{12}$) よりも急激である, などの特性を読みとることができる.

3.4. この手法の一般性に関する考察

ここで述べた手法に一般性があるかどうかの議論は, 次の3つの指標が対象とする都市によらず移転性を持つかどうかにか集約される.

- タクシーの距離帯別地区通過確率
- タクシーのトリップ数原単位
- タクシーの地区ごと基本リンクカバー率

いずれも実データを使って実証的に検証するべきものであるが, 十分なデータがそろわない現状では, 以下のような定性的な考察から, これらの指標に一般性があるという仮定を置いていることになる.

の距離帯別地区通過確率は, その都市でのタクシーが分担するトリップ距離帯そのものである。これは鉄道やバスなどの他のモードが分担する距離帯にも影響されるが, 利用客の家計による制約と, 全国ではほぼ一律の料金体系を考えると, 都市によらずある一定の距離帯にまとまることは想像がつく。

のトリップ数原単位も, タクシー1台あたりの収入が一定以上なければ, 営業を続けることが難しくなり, 逆に極端に多ければ, 他のタクシーが参入してくると考えられるため, これも都市によらず一定範囲に収まると期待される。

については, 都心商業地や住宅地といった利用形態ごとに一般的な地区の特性があり, 同じ住宅地であれば, 都市が違って道路網はほぼ同じように整備され, その結果「タクシーの利用形態は類似する」という前提に立っている。

これらの仮定が妥当であれば, ~ それぞれの指標について, 標準的な値を整備することで, ここで述べた評価手法はより汎用度の高い実用的なものとなる。試験的に一部の車両をプローブとして運用し, その挙動をもとに拡大する方向で検討することも可能であるが, 地域移転性が確保されるのであれば, 次のようなデータを利用して, 簡便に値を得ることもできよう。

まず と については, 対象とする都市で営業しているタクシーの業務日報より「いつ, どこから, どこまで」乗客を運んだかが把握できれば, 大まかにトリップ長分布やトリップ数原単位を把握できるだろう。一方, の基本リンクカバー率を詳細に議論するには, タクシーの経路選択行動を分析し, 選択モデルを構築して地区内のリンク利用確率を推計することになる。これは一般に経路選択行動の分析にはコストと技術的困難さを伴ううえに, 残念ながら業務日報で運行経路まで記録しているタクシー業者は, 現状では希である。したがって, リンク利用の偏向を把握するには, IPCar12 や IPCar13 のような実施済みの大規模プローブ運用実験の結果から整備せざるを得ない。

IPCar12とIPCar13で, これらの指標がどのように得られたかは, 次章で述べる。

4. 効率的なプローブ配備戦略についての考察

実際に対象とする都市にプローブを配備するときは, 次のような問題に直面する。すなわち, 配備可能なプローブの最大数は, 想定するサービスから得られる収益と初期費用, 運用費用の関係や, 協力してくれる業者の数などによって, 制約を受ける。このとき「どの拠点にプローブを何台ずつ割り当てれば, リンクカバ

ー率をもっと大きくなる」ように配備できるかが効率面から検討されなければならない。

ここでは, 以下の前提で問題を単純化し, 効率的なプローブ配備の一般的な戦略を考察する。

都市内に配備可能なプローブの最大台数 n は所与である。

プローブを配備可能な M 個の拠点は, 都市内にほぼ等間隔で均等に位置しており, そのうちのランダムに選択した m 個それぞれに, n/m 台のプローブを配備する。

都市内のどの地区も, リンク利用率の偏向の様子は変わらない。すなわち(式2)のプローブ地区通過頻度のみでリンクカバー率の大小を評価できる。

ある地区を通過するプローブは, 最寄りの2つの拠点到に配備されたもののいずれかである。

考察に当たっては, 次の2つの戦略を取り上げる。ここでは, 戦略2のほうが1よりも「広く, 薄く」プローブを配備するものである。

戦略1... m' 個の拠点到に, それぞれ n/m' 台のプローブを配備する。

戦略2... m' の1.5倍になる m'' 個の拠点到に, それぞれ n/m'' 台のプローブを配備する。

今, 都市の規模が直径 D の円で, そこに m 個の拠点を配備する場合, それらは前提 より均等に分布するので, 隣接拠点間の距離の期待値は $l=D/m$ となる。したがって, ある拠点から x だけ離れた地区におけるプローブの通過頻度 $N(x)$ は, 前提 より(式5)で表される。

$$N(x) = \frac{nk}{m} (F(x) + F(l-x)) \quad (式5)$$

図5は戦略1と2それぞれの地区プローブ通過頻度を示した図である。すなわち x での通過頻度は隣接する2拠点の通過頻度分布を合成したものである。

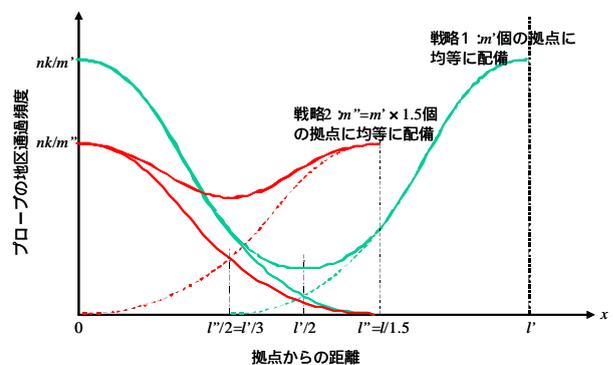


図5: プローブ配備拠点数を変えた場合の通過頻度

図6は図5の横軸を, 拠点間の平均距離で正規化したものである. 想定するサービスで要求される情報更新頻度が与えられたとき, 前提より, それぞれの戦略での通過頻度曲線が要求頻度を上回る範囲(図中のと)が, リンクカバー率に相当する. ここで戦略1と2の曲線が交差する点の頻度が臨界値であり, サービスがこれ以上の更新頻度を要求する場合は戦略1が, これ以下なら戦略2が優位であることを示している.

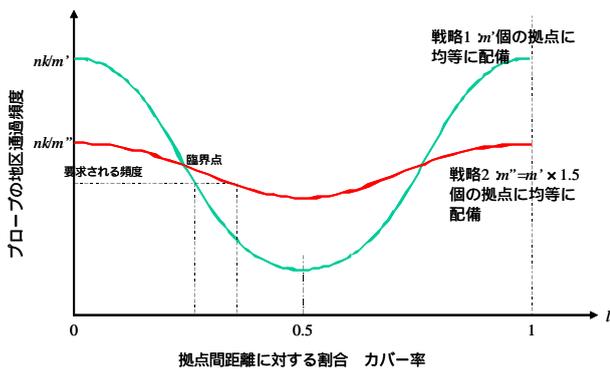


図6. プローブ配備拠点の数を変えた場合のカバー率

5. リンクカバー率推計手法の実証

5.1. 推計に使われる諸量の同定

ここでは, IPCar 実証実験で得られた各種データを利用しながら, これまでに述べたリンクカバー率の推計手法がどのように適用されるかを実証的に確認する.

まず, タクシーの地区通過頻度を IPCar13 で収集されたタクシー運行管理データを使って確認する. これは事業者が配車管理のための独自に取得しているもので, 詳細な経路を同定することはできないが, 利用客が乗降した時刻と地点が記録されている. IPCar13 では400台分のデータを14日間に渡って収集した.



図7 横浜駅西口起点のタクシー実車トリップ分布幅 33km

図7は横浜駅を起点とする実車トリップについて, その終点への直線を示したものである. 半径5km程度の範囲では, 海をのぞく全方向にほぼ均等にトリップ終点が分布している. 図8は各時間帯での, これらトリップの直線距離の分布を示したものである. 各時間帯とも, 1~6kmの距離帯にトリップが集中し, 2~3kmにピークを持つ分布になっていることがわかる.

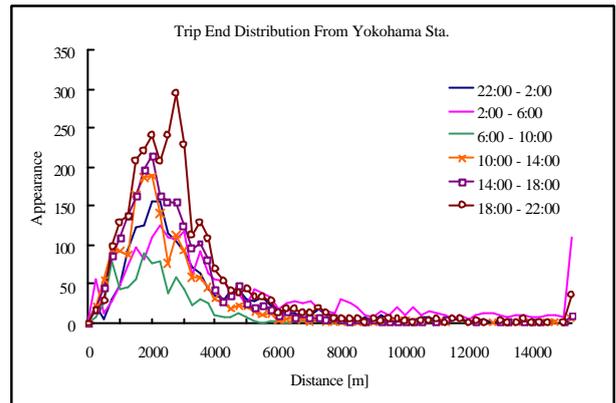


図8 横浜駅西口が起点のタクシー実車トリップ長分布

図9は14時~18時の実車トリップ長の累積頻度分布である. 図中に, もっともよく形状が適合するガンマ分布による近似曲線と, それよりやや乖離するものの, 数式として扱いやすい位相2のアーラン分布での近似曲線を併記した.

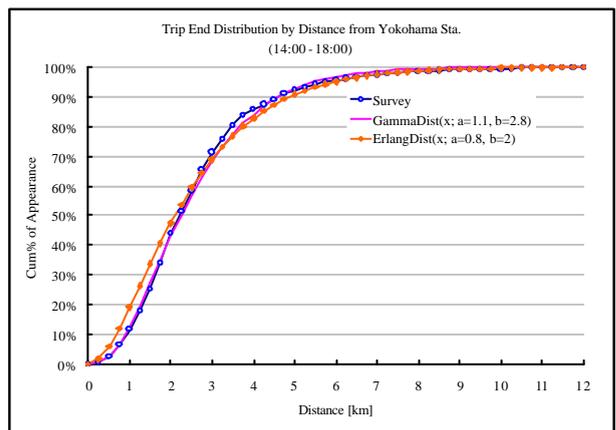


図9 横浜駅西口が起点の実車トリップ長累積頻度分布

タクシートリップエンドの分布 $f(x)$ が位相2のアーラン分布, すなわち(式6)で $b=2$ としたもので近似できる場合, これを(式1)にあてはめ, (式7)のようにパラメータ a をもつ地区の距離帯別トリップ通過確率分布

$F(x)$ を得る. なお図9より, ここでは $a=0.8$ とする.

$$f(x; a, b) = \frac{1}{(b-1)!} a^b x^{b-1} e^{-ax} \quad (\text{式 6})$$

$$F(x; a) = (ax + 1)e^{-ax} \quad (\text{式 7})$$

つぎに, タクシーのトリップ数原単位である. 図10は同じタクシー運行管理データから, 横浜市全域での1台あたりの各営業日14時~18時における実車トリップ数の頻度分布を示したものである. ばらつきが認められるものの, 平均で5.36[回/4時間]の実車トリップとなっている. 実際には空車トリップもあるので, 拠点間を往復するという仮定から, この時間帯におけるタクシーのトリップ数原単位を, 2倍の値に設定する.

$$k = 5.36 * 2 / 4 = 2.18 \text{ [トリップ/時]} \quad (\text{式 8})$$

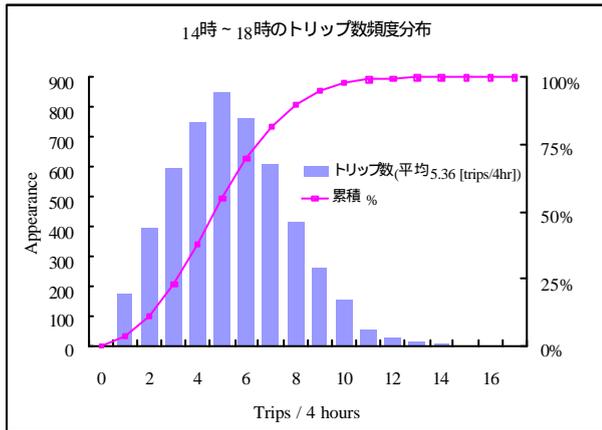


図10 14時から18時の実車トリップ数頻度分布

最後に, リンク利用特性の偏向を示す基本リンクカバー率を, IPCar13の前年に実施されたIPCar12での実験結果を用いて同定する. IPCar12では戸塚地区に営業所を持つ1社にだけプローブ実験に協力してもらっており, 41台のプローブを約1ヶ月間運用した.

図11は戸塚駅周辺の2km圏と2~5km圏の地区について, リンク利用の偏向を調べたものである. 横軸は14時~18時の通過頻度実績値であり, 縦軸はその通過頻度以上となるリンク長の総延長比である. いずれも右下がりであり下に凸の曲線で, 拠点に近い2km圏のほうがリンク利用の偏向が小さいことを示している. なお, 図11が理論的にどのような分布になるかは不明であるので, この関係を以降そのまま利用する.

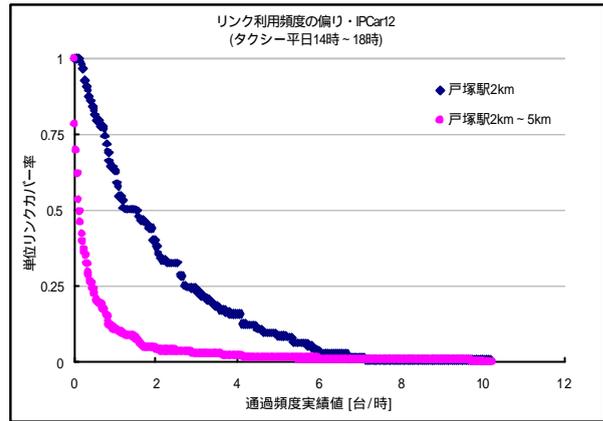


図11 IPCar12での戸塚駅周辺のリンク利用頻度偏向

一般的な単位リンクカバー率を同定するためには, 図11の横軸をトリップ総数に対する通過頻度実績値の比率としてスケーリングする必要がある. 図12は, 41台のタクシーの稼働率を70%とし⁴⁾, また2km圏を距離1kmの地区に, 2~5km圏を距離3.5kmの地区に代表させ, (式7)と(式8)から推計した以下の総トリップ数で, 図11をスケーリングしたものである.

$$\begin{aligned} 2\text{km圏} &: 41 * 0.7 * 2.18 * (0.8 + 1) \exp(-0.8) \\ &= 50.6 \text{ [trips/hr]} \quad (\text{式 9}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2 \sim 5\text{km圏} &: 41 * 0.7 * 2.18 * (0.8 * 3.5 + 1) \exp(-0.8 * 3.5) \\ &= 14.5 \text{ [trips/hr]} \quad (\text{式 10}) \end{aligned}$$

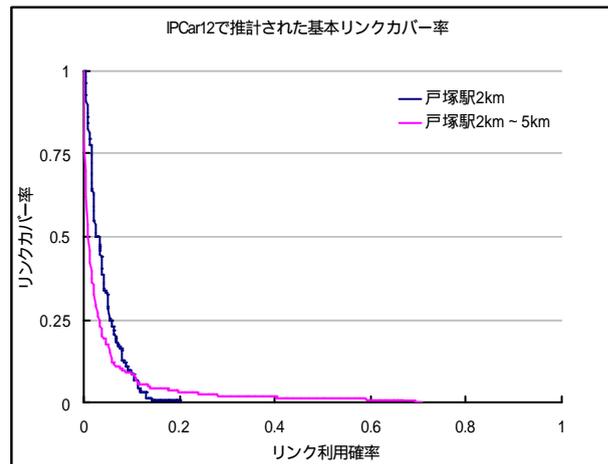


図12 IPCar12で推計された基本リンクカバー率

5.2. IPCar13でのリンクカバー率の検証

検証のため, IPCar13でのリンクカバー率を推計する. IPCar13では, 横浜・関内エリアに営業所を持つタクシー75台のほか, 新横浜エリアに25台, 戸塚工

リアに38台をプローブとして運用している。ここでは横浜駅を中心とした半径2km圏と2km~5km圏でのリンクカバー率を求めた。すなわち、横浜・関内エリアのタクシー75台に対するそれぞれの総トリップ数を(式9)(式10)と同様に推計し、図12の横軸を拡大するものである。

図13に推計したリンクカバー率と、IPCar13での実績値を示す。2km~5km圏については比較的良好に実績値を再現しているが、2km圏のほうは過大推計となっている。理由についてはいろいろ推察されるが、75台のタクシー全てが横浜駅を拠点としていないため、総トリップ数を過大に推計していることが挙げられよう。参考のため、総トリップ数を過剰推計していると考え、推計値の横軸拡大率を半分にした値を図13に併記する。今度は2km圏の実績値をよく推計しているが、2~5km圏は若干の過小推計となる。これは横浜駅から離れるにつれ、実績値の方は新横浜駅などの拠点に属するタクシープローブの通過が記録される頻度が大きくなっているためと解釈できよう。

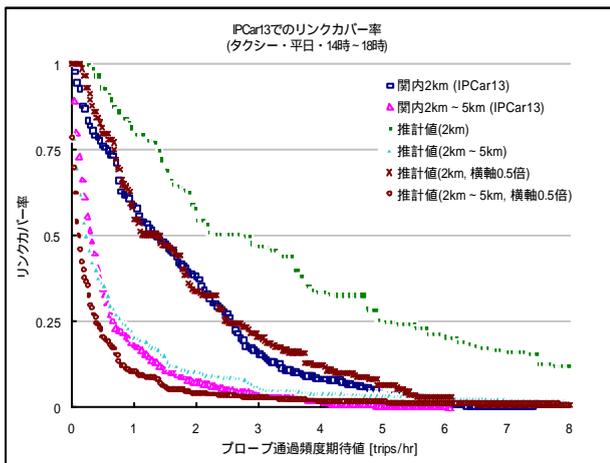


図13 IPCar13でのリンクカバー率推計値と実績値

6. まとめ

以上において、タクシープローブの配備台数により期待されるリンクカバー率の推計手法を理論的な枠組みに基づいて提案し、その有効性をIPCar実証実験のデータを使いながら確認した。また、配備戦略についても理論的考察を行い、要求する情報更新頻度によって、拠点を分散させる場合と集中させる場合で、期待されるリンクカバー率の大小が異なることを示した。

謝辞：本研究の実施にあたり、データを提供いただいた(財)自動車走行電子技術協会様、日本電気(株)様、ならびにNECソフト(株)様に深甚なる謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 自動車走行電子技術協会：ITSの社会的有効性向上に係るシステムの実証・報告書(平成14年3月), 2002.
- 2) 石田東生, ほか：高度情報機器を用いた走行速度調査における抽出率の検討, 土木計画学研究・論文集, Vol. 18, pp. 81-88, 2001.
- 3) K. Makimura, *et al.*: Performance indicator measurement using car navigation systems, TRB Annual Meeting, 2001.
- 4) 堀口良太, ほか：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, No.25, 2002.