

情報利用損失に着目したタクシープローブカーの最適割当計画*

Optimum Allocation Problem of Probe-Taxies Focusing on Loss of Traffic Information Users*

三輪富生**・石黒洋介***・山本俊行****・森川高行*****

By Tomio MIWA**・Yosuke ISHIGURO***・Toshiyuki YAMAMOTO****・Takayuki MORIKAWA*****

1. はじめに

道路網上を走行する車両間には走行特性や走行状態の差異が存在し、このため、ある道路区間の旅行時間（以降、“リンク旅行時間”と呼ぶ）は車両ごとに確率的に生起する。したがって、そのサンプルであるプローブカーデータから生成された交通情報（観測されたリンク旅行時間の平均値）と確率的に生起する実旅行時間との差、すなわち情報の誤差もまた確率変数である。本研究は、このようなプローブカーシステムで生成される交通情報の誤差に着目する。誤差を含む交通情報を提供すると、実現した早着、遅刻時間に応じて情報利用者は損失を被る。情報提供者は、このような提供情報を利用することに起因する損失（以降、“情報利用損失”と呼ぶ）の最小化を目指さなくてはならない。

本研究は、対象エリア内で活動するタクシーをプローブカーに割当てるタクシープローブカーシステムにおいて、この情報利用損失を最小にするためのプローブカー割当て方法を検討する。つまり、対象エリア内のタクシー営業所に対して、情報利用損失を最小にするためには、どこの営業所からそれぞれ何台のタクシーをプローブカーとすべきかを考えるものである。なお、以降では、1台のプローブカーから得られたデータを“プローブデータ”、プローブデータから生成、提供される交通情報を“プローブ交通情報”と呼ぶ。

2. プローブ交通情報の利用により生じる損失

(1) プローブ交通情報の誤差の分布

ある道路区間（以降、“リンク”と呼ぶ）で実現する旅行時間は通過車両ごとに確率的に生起し、このリンク

の交通情報には、その期待値である平均旅行時間を用いることになる。すなわち、プローブカーシステムで交通情報を生成するためには、このリンクで観測されたプローブデータから平均旅行時間を算出すればよく、実際にそのような処理が行われている¹⁾。

さて、時間間隔 h 、リンク a での旅行時間 $t_{a,h}$ が、母平均 $\mu_{a,h}$ 、母分散 $\sigma_{a,h}$ の確率変数であるとする。ここでは、既往研究²⁾と同様に、この分布に正規分布を仮定するが、他の確率分布を仮定しても同様の議論が可能である。この母集団からプローブデータとして大きさ $N_{a,h}$ の旅行時間サンプル $\{t_{a,h,1}, t_{a,h,2}, \dots, t_{a,h,N_{a,h}}\}$ を観測したとき、プローブ交通情報となるこの平均値（母平均の推定値） $\bar{t}_{a,h}$ は以下の正規分布に従う。

$$\bar{t}_{a,h} \sim N\left(\mu_{a,h}, \frac{\sigma_{a,h}}{N_{a,h}}\right) \quad (1)$$

このとき、リンク a を通過するある車両が実際に経験する旅行時間と上記のプローブ交通情報（ $\bar{t}_{a,h}$ ）との差、すなわちプローブ交通情報の誤差 $e_{a,h}$ は、母集団が従う分布 $(N(\mu_{a,h}, \sigma_{a,h}))$ とプローブ交通情報が従う分布との差であり、以下の正規分布に従う確率変数となる。

$$e_{a,h} \sim N\left(0, \sigma_{a,h} + \frac{\sigma_{a,h}}{N_{a,h}}\right) \quad (2)$$

上式からも分かる通り、プローブ交通情報の誤差の分布は、リンク旅行時間の母集団分布より分散が大きくなる。ただし、プローブデータ数 $N_{a,h}$ が大きくなるにつれて、誤差の分散は母分散に近づく。このような、生成された交通情報について、その誤差の分散がもともと存在していた旅行時間の分散より大きくなってしまいう性質は、プローブカーシステムに限らず観測データから真の情報を推定する全ての交通情報システムにあてはまる。しかしながら、リンクごと、時間間隔ごとの観測データ数が少ないプローブカーシステムでは顕著な性質といえよう。

以上は、プローブデータが得られた場合（すなわち、サンプル数 $N_{a,h} > 0$ の場合）を想定している。プローブデータが得られていない場合に、情報提供者が経験的に設定する交通情報の初期値を $t'_{a,h}$ とすると、この場合の情報誤差の分布は以下のようなになる。

*キーワード：交通情報，ITS，プローブカー

***正員，博士(工)，名古屋大学エコトピア科学研究所
(名古屋市千種区不老町，TEL:052-789-3565，

E-MAIL: miwa@civil.nagoya-u.ac.jp)

***正員，修士(工)，株式会社デンソー ITS開発部

****正員，博士(工)，名古屋大学大学院工学研究科

*****正員，Ph.D.，名古屋大学大学院環境学研究科

$$e_{a,h} \sim N(t'_{a,h} - \mu_{a,h}, \sigma_{a,h}) \quad (3)$$

上式からも分るように、プローブデータが得られていない場合の方が、得られた場合より情報誤差の分散が小さい。また、この際の情報誤差の期待値は、交通情報の初期設定値に依存して変化する。したがって、初期設定値がたまたま真の母平均と一致する場合に、予測誤差を最も小さくできる。ただし、なんら情報が得られていない状況では、初期設定値 ($t'_{a,h}$) と真の母平均 ($\mu_{a,h}$) との差を検証する術がないことは言うまでもない。

以上より、時間間隔 h にリンク a で観測されるプローブデータ数が n となる確率を $R_{a,h}(n)$ とすると、プローブ交通情報の誤差の分布は以下のように表せる。

$$e_{a,h} \sim N(\tau_{a,h}, \nu_{a,h}) \quad (4.a)$$

$$\tau_{a,h} = R_{a,h}(0) \cdot (t'_{a,h} - \mu_{a,h}) \quad (4.b)$$

$$\nu_{a,h} = R_{a,h}(0) \cdot \sigma_{a,h} + \sum_{n=1}^{\infty} R_{a,h}(n) \cdot \left(\sigma_{a,h} + \frac{\sigma_{a,h}}{n} \right) \quad (4.c)$$

ここに、 $\tau_{a,h}$ はプローブ交通情報の誤差の平均、 $\nu_{a,h}$ はその分散である。

(2) プローブ交通情報の情報利用損失

時間間隔 h に、車種 b のある車両がプローブ交通情報に従ってリンク a を通過する場合、実現した情報誤差に時間価値を乗じた大きさの損失が発生すると仮定する。このとき、当該車両が被る情報利用損失の期待値 $L_{b,a,h}$ は以下のように表せる。

$$L_{b,a,h} = \int_{-\infty}^{\infty} f_{a,h}(e) \cdot g_b(e) \cdot e \, de \quad (5)$$

ここに、 $f_{a,h}(\cdot)$ は式 (4) で表されるリンク a に関する情報誤差の確率密度関数、 $g_b(\cdot)$ は情報誤差量に対する車種 b の損失額を表す関数である。この考え方を図-1に示す。図からも分かる通り、情報利用損失を小さくするためには、情報誤差の期待値を0に近づけ、分散を小さくすればよい。

なお本研究では、各車両が被る損失額は情報誤差に対して単調に増加し、その増加率は車種別の時間価値で表せると仮定する。既往研究からは、早着と遅刻では効用の減少率が異なることや、その変化が線形関係にないこと等が示されているが^{3,4)}、ここでは簡便のため費用便益分析⁵⁾で用いられる車種別時間価値を用いることとする。また、出発時刻選択に関する既往研究からは、到着制約時刻に対する時間的猶予(セーフティマージン)の存在が示されている⁶⁾。しかし、誤差の小さな理想的なシステムを目指す情報提供者にとっては、情報利用者がその誤差を見越して設定するセーフティマージンを考慮

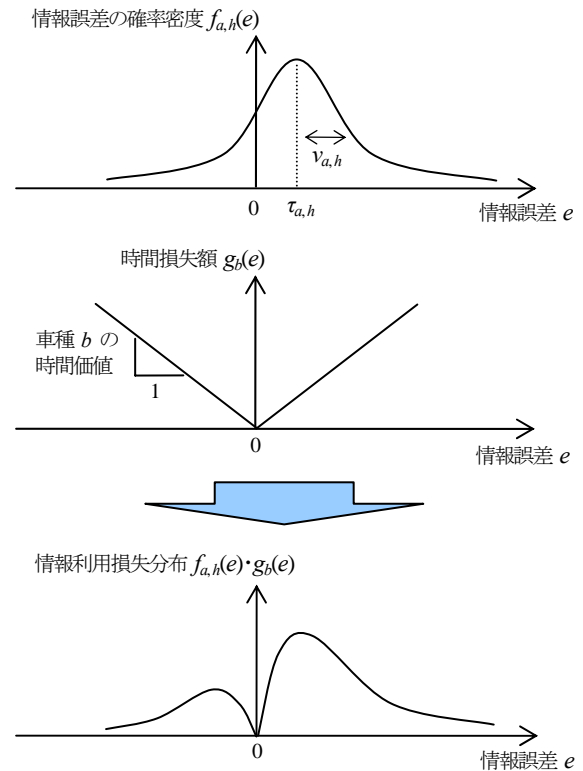


図-1 交通情報の誤差分布と情報利用損失の関係

する必要はない。

(3) プローブデータ数と情報誤差・情報利用損失

図-2は、長さ1kmのリンクについて、リンク旅行時間の母平均 ($\mu_{a,h}$) を2.0min. (=30km/h) とし、交通情報の初期設定値 ($t'_{a,h}$) を変化させた場合の、情報誤差の期待値と分散および情報利用損失の変化を示している。ただし、いずれのケースでも交通情報の母分散 ($\sigma_{a,h}^2$) は1.0min²、時間価値を62.86(円/台分)⁵⁾としている。また、プローブカーデータの観測確率 ($R_{a,h}(n)$) は、プローブカーの通過頻度に負の2項分布を仮定した上で、その期待値を変えながら各通過回数の観測確率を算出した。各図の横軸はその期待値である。

この結果より、情報誤差の期待値は、交通情報の母平均と初期設定値との差が大きいくほど、その絶対値が大きくなるが、プローブデータ数の増加によって小さくなる。情報誤差の分散は、式(4.c)からも分かるように、交通情報の初期設定値には影響を受けず同じ値となる。ただし、プローブデータ数の増加に伴って一旦は分散が大きくなり、その後、母分散に近づいていく。また、情報利用損失については、交通情報の初期設定値と母平均が近い場合(赤線)はプローブデータが得られない場合の方が小さいが、その差が大きくなると(緑線)プローブデータ数の増加によって単調に減少することが分かる。以上の結果から、交通情報の初期設定値が母平均と大きく異なるリンクほど多くのプローブデータが得られるよう

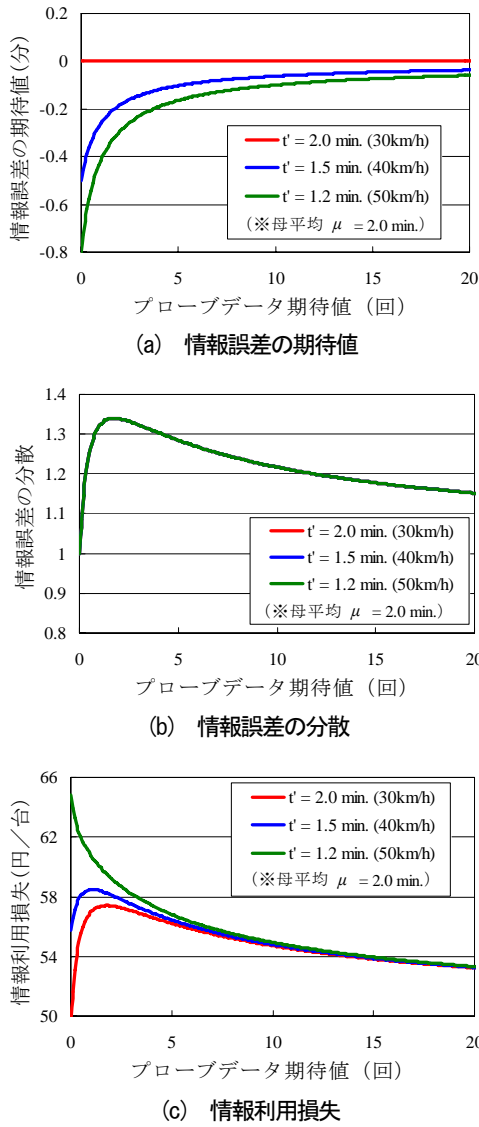


図-2 プローブデータ数と情報誤差・情報利用損失

に、プローブカーの割当てを行うことが望ましいことが分かる。

3. プローブカーの最適割当て問題

タクシープローブカーシステムにおいて、各リンクのプローブカー通過頻度は、プローブカー総数や各タクシー営業所への割当て台数、データ収集期間によって変化する。ここでは、プローブカー総数およびデータ収集間を与件とした場合に、道路ネットワーク全体で生じる情報利用損失を最小化するための、プローブカーの最適割当て問題を考える。

前章までの議論では、ある1本のリンクを対象としていたが、プローブ交通情報の誤差がリンク間で独立であると仮定すれば、ある経路旅行時間情報の誤差分布は、この経路を構成するリンクについてその誤差分布を足し合わせれば得られる。また、道路網上を走行する各車両

は、提供された情報に従って経路を選択すると仮定する。このとき、各ODペアの交通量が与えられれば、各リンクの交通量は各リンクの提供情報を用いてDial法により算出することが可能となる。

そこで、割当て可能な総プローブタクシー数を M 、対象エリア内のプローブタクシーが割当て可能なタクシー営業所数を K 、 k 番目営業所に割当てられたプローブカー数を m_k と表記し、全営業所の割当て数からなるベクトルを $\mathbf{m} = \{m_1, m_2, \dots, m_K\}$ とおく ($M = \sum_k m_k$)。さらに、データ収集期間を T と表す。このとき、対象エリア内の各タクシー営業所に、それぞれ何台のタクシーをプローブカーに割当てるべきかは、提供情報の関数として得られるリンク選択確率と各リンクの情報誤差の分布を用いて、各リンクで生じる損失の総和を最小化する問題として以下のように表される。

$$\min L = \sum_{h,b,rs,a} Q_{b,rs,h} p_{b,rs,a} (\boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\tau}_h^{T,m}) \int_{-\infty}^{\infty} f_{a,h} (e^{|\tau_{a,h}^{T,m}, v_{a,h}^{T,m}|}) g_b(e) de \quad (6.a)$$

$$f_{a,h} (e^{|\tau_{a,h}^{T,m}, v_{a,h}^{T,m}|}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} v_{a,h}^{T,m}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{e - \tau_{a,h}^{T,m}}{v_{a,h}^{T,m}} \right)^2 \right\} \quad (6.b)$$

Subject to

$$\sum_k m_k = M \quad (6.c)$$

ここに、時間間隔 h 、OD ペア rs 、車種 b について、 $Q_{b,rs,h}$ はOD交通量、 $\boldsymbol{\tau}_h^{T,m}$ はデータ収集期間が T 、プローブカー割当てパターンが \mathbf{m} のときの、リンクの情報誤差期待値からなるベクトル、 $\boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\tau}_h^{T,m}$ はリンクに対する提供情報の期待値からなるベクトル、 $p_{b,rs,a} (\boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\tau}_h^{T,m})$ はリンク a の選択確率であり Dial 法によって計算できる。

この問題は、エリア内タクシーへのプローブ割当てパターン \mathbf{m} の最適化問題である。すなわち、プローブ割当てパターンの変化によって各リンクのプローブ通過確率 $R_{a,h}^{T,m}(n)$ が変化し、これにより情報誤差の分布、すなわち $\tau_{a,h}^{T,m}$ および $v_{a,h}^{T,m}$ が変化する、さらに提供情報 $(\mu_{a,h} + \tau_{a,h}^{T,m})$ に応じてリンク交通量が変化することで総損失が決定される。また、実際には、全てのドライバーが提供情報に従って経路を選択しないと考えられる。しかし、情報提供者は、全ての車両に利用されても交通状況を改善できる情報の生成、提供を目指すべきであり、ここではそのような規範的な情報提供者を仮定している。

4. プローブカー割当てパターンの最適性に関する考察

(1) 計算の条件

a) プローブカーシステムとプローブカー通過頻度

本研究で対象とするのは、名古屋市周辺の41箇所のタクシー営業所655台のタクシーである。ここで、実際には、各タクシー営業所への割当て可能台数が存在するが、問題が複雑となるためこれを考慮しない。また、1ヶ月間の観測データから、既往研究²⁾と同様に各リンクの特性を考慮したプローブカー通過頻度をモデル化し、この期待値にデータ収集期間(T)を乗ずることで、エリア内DRMリンクのプローブデータ数観測確率を算出する。

b) 交通情報の母数および初期設定値

交通情報の母数は、本来は把握不可能であるが、ここでは母平均が正規分布、観測値の(観測値平均との)偏差二乗和と母分散($\sigma_{a,h}^2$)との比がカイ二乗分布に従うことを仮定し、リンク属性を説明変数とした回帰モデルを最尤推定した。また、初期設定値は、一般道路で30km/h、都市内、都市間高速道路で80km/hの速度を設定した。

c) 車種別・時間帯別OD交通量とDial配分

交通需要は、平成17年度道路交通センサスOD集計用マスターデータから車種別BゾーンOD交通量(4車種:乗用車,バス,小型貨物車,普通貨物車)を1時間帯別に集計し、車種別時間価値は費用便益分析マニュアル⁵⁾より設定した。さらに、Dial法における分散パラメータは1.0(1/分)とし、時間帯間の残留交通量や配分交通量に応じたリンク旅行時間の変化は考慮していない。

(2) 割り当てパターンと最適性に関する考察

本研究では、プローブカー総数やプローブカー割当て可能なタクシー営業所が固定されているものの、実行可能解は膨大なパターン数となる。そこで、幾つかの典型的な割り当てパターンを事前に設定し、それらの最適性(情報利用損失額)の比較を通じて、最適な割り当てパターンに関する知見を得る。

割り当てパターンは、a) 現状パターン、b) 均等パターン、c) 都心集中パターン、d) 郊外分散パターンの4種類とする。都心集中パターンは、名古屋市繁華街の中心から半径3kmのエリアに位置する10箇所のタクシー営業所のみ(均等に)割当てるパターン、郊外分散パターンは、同じく名古屋市繁華街の中心から半径7kmのエリアの外側に位置する17箇所のタクシー営業所のみ(均等に)割当てるパターンである。

図-3は、情報収集期間を変化させた場合の、各割り当てパターンに対する総情報利用損失額を示している。都心集中パターンと郊外分散パターンを比較すると、データ収集期間が短い場合には都心集中パターンが効率的であるが、6ヶ月を境に郊外分散パターンの方が効率的になる。これは、都心ほど交通量が多く、損失額を低下させるためにはより多くのプローブデータが必要であるが、郊外の営業所に配備されたタクシーであっても都心を走行する確率がある程度見込めるため、データ収集期間が

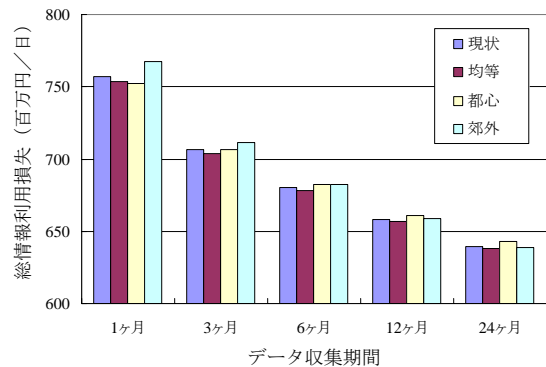


図-3 プローブ割当てパターンと総情報利用損失

長い場合には郊外地域もカバーできるように割当てたほうが効率的であることを示している。ただし、均等パターンの情報利用損失は、いずれのデータ収集期間においても都心集中パターンや郊外分散パターンと同程度かそれより小さく、データ収集期間が予め決まっていない場合は、均等に割当てることが効率的であることが分かる。

5. おわりに

本研究では、観測サンプルから交通情報を生成するシステムにおいては、提供情報の誤差のばらつきが実際に生じている交通情報のばらつきよりも大きくなることを示した上で、この誤差により情報利用者が被る損失を最小化するタクシープローブカー割当て問題を検討した。

今後の課題として、既に主要な幹線道路には固定観測機器による情報の収集、提供が行われており、この情報の誤差はプローブカーシステムより小さいと考えられる。そこで、プローブカーシステムやその他の交通情報システムについて、カバーエリアの効率的な分担方法を考慮した、総合的な交通情報システムの最適整備方法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、森川高行, 山本俊行, 三輪富生, 王立暁: 動的経路案内システム「PRONAVI」の開発と性能評価実験, 交通工学, Vol. 42, No. 3, pp. 65-75, 2007.
- 2) 石黒洋介, 三輪富生, 山本俊行, 森川高行: 情報の信頼性と収集頻度を考慮したプローブカーの最適配置計画, 土木計画学研究・講演集, Vol.35, CD-ROM, 2007.
- 3) Hendricson, C. and Plank, E.: The flexibility of departure time for work trips, Transportation Research Part A, Vol. 18, No.1, pp.25-36, 1984.
- 4) Jou, R.C., Kitamura, R., Weng, M.C. and Chen, C.C.: Dynamic commuter departure time choice under uncertainty, Transportation Research Part A, Vol.42, No.5, pp.774-783, 2008.
- 5) 国土交通省 道路局 都市・地域整備局: 費用便益分析マニュアル, 2003.
- 6) Hall, R.W.: Travel outcome and performance: The effect of uncertainty on accessibility, Transportation Research Part B, Vol.17, No.4, pp.275-290, 1983.