

時間的交通分散を目指した旅行計画提示手法の提案

赤嶺 有平^{1,a)} 遠藤 聡志¹ 上原 和樹² 根路 銘もえ子³

受付日 2013年4月9日, 採録日 2013年10月9日

概要: 交通渋滞は、経済損失を発生させるだけでなく環境へ悪影響も与えるため、その解決が強く求められている。一方、スマートフォン等の普及により位置情報の取得と通信による情報共有が安価に実現できるようになっており、得られた交通情報を活用した渋滞解消策が望まれる。本論文は、プローブカー等により所要時間のリアルタイムデータの推定や過去の蓄積データが利用可能な状況下において、適切な出発時刻および経路をユーザに提示することで、時間・空間的に交通量を分散する手法を提案する。さらに、パーソントリップ調査に基づく実データを用いたシミュレーション実験によりその効果を検証する。

キーワード: 高度交通情報システム, 交通シミュレーション, 交通需要マネジメント

The Traffic Planning Presentation Method for Temporal Dispersion of Traffic Demand

YUHEI AKAMINE^{1,a)} SATOSHI ENDO¹ KAZUKI UEHARA² MOEKO NEROME³

Received: April 9, 2013, Accepted: October 9, 2013

Abstract: Traffic congestion is a major problem in many modern cities because it causes large economic losses and negatively affects to the city environment. In the meantime, traffic information has been easily collectable in real time with popularization of mobile devices that are able to communicate and localize itself. A solution using the traffic information is desired. In this paper, we propose a method to spread traffic demand temporally with indication of appropriate departure time and route for user under the situation that hourly trip time is available in real time by probe cars. In addition, we prove the efficiency of the method by the traffic simulation using actual data of person trip census.

Keywords: ITS, traffic simulation, TDM

1. はじめに

交通渋滞は、全国各地で見られる一般的な社会問題であるにもかかわらず、高度成長期から今日に至るまで未解決のままとなっている。渋滞は、経済損失を発生させるだけでなく排気ガス、騒音、振動等による環境負荷も大きい。特に、軌道交通網の充実していない地方都市においては、

陸上交通の大部分を道路に依存しており、渋滞によるバスの利便性低下にともなってバス離れが加速するという負の循環に陥っている。今後大幅な道路拡張が望めない現状では、既存の道路ネットワークをいかに効率良く利用できるかが重要であり、ITS（高度道路交通システム）を活用した交通負荷分散が期待されている。

ITSを用いた交通負荷分散手法として最も期待されているのがスマートフォン等の位置情報の取得と通信が可能なデバイスを用いて渋滞情報を共有することで迂回を促す方法である。しかし、道路ネットワークの負荷が交通容量の上限近い状態に達しているような状況では、迂回経路の交通容量に余裕がなく迂回による二次的な渋滞の発生やそもそも迂回経路が存在しないという状況が起こりうる。したがって、経路を分散させることによる旅行時間の短縮効果

¹ 琉球大学工学部
Faculty of Engineering, University of the Ryukyus,
Nakagami, Okinawa 903-0213, Japan
² 琉球大学理工学研究科
Graduate School of Engineering and Science, University of
the Ryukyus
³ 沖縄国際大学経済学部
Department of Economics, Okinawa International University
a) yuhei@ie.u-ryukyuu.ac.jp

はあまり期待できないと考えられる。

一方、ピーク時の交通量が容量の上限に近いような地域においてもその前後の時間帯の交通容量には余裕があることが多く、出発時刻をずらすことによりピーク時の交通量を減少させることが可能である。これを利用した TDM (Transportation Demand Management, 交通需要マネジメント) と呼ばれる政策として、行政によるフレックスタイム制や時差出勤・通学等の導入事例が増えてきてはいるものの本格的な普及には至っていない。時差と渋滞軽減もしくは旅行時間軽減の関係が不透明または説明不足であること等が原因として考えられる。

本論文では、スマートフォン等により所要時間のリアルタイムデータおよび蓄積データが共有可能な状況を想定し、これらの情報を活用することで自動車の利用者（以下、「利用者」と記述した場合は自動車の利用者を指す）に具体的な出発時刻および所要時間を提示し時差出勤・通学を促すシステムを提案する。さらに、マルチエージェントシステムによる交通シミュレータを用いた導入効果の評価実験について報告する。これまで、リアルタイム所要時間の共有を想定した研究報告においては、仮想ネットワークに対して乱数により決定された出発地、到着地間の交通需要を用いたシミュレーション評価が行われている [1], [2]。仮想データを用いたシミュレーション評価においては、交通量、道路の交通容量の設定等により一意な結果が得られず、またこれらのパラメータが結果に与える影響が大きいという問題がある。しかしながら、実データを用いたシミュレーション実験はほとんど行われていないようである [3]。そこで、本研究では、国土地理院発行の電子地図データおよびパーソントリップ調査に基づく交通需要を入力データとして利用することで実環境に近いシミュレーションを行う。地域データは、交通渋滞が深刻な社会問題となっている沖縄県那覇市およびその通勤圏をモデルとした。

沖縄県は軌道交通がほとんどないため、都市部における渋滞が深刻な問題となっており、交通渋滞の緩和策が強く求められている。県民 1 人あたりの渋滞損失額は全国 4 位となっており、那覇都市圏の混雑時平均旅行速度は、大都市以下となっている。また、バス路線が不便なため利用率が低く、県民の 62% が自動車通勤である。さらに、車両 1 台あたりの道路面積が全国平均の約半分であるうえ、依然として車両台数は増加傾向にある。そのため、つねに道路整備が追いつかない状況にあり既存道路の有効活用が必要となっている。一方、島嶼県のため県外からの車両の流入がなく、大都市圏より交通網の規模が小さいためシミュレーション実験に適している。さらに、沖縄県の入域観光客 550 万人 (平成 17 年) のうち 42% がレンタカーを利用しており (レンタカー観光調査報告書 [4])、そのうち 28% が渋滞情報および迂回路情報の提供を望んでいるという調査結果がある。1 日あたりでは、平均 6 千人がレンタカーを

利用していることになるため、レンタカーを用いた大規模な実証実験を行える可能性がある等様々な展開が期待できる。

2. 交通シミュレータ

シミュレータは、筆者らが独自に開発したソフトウェア [5] をベースに構築したものをを用いる。

2.1 地域データ

シミュレーションに用いた地域データは、那覇通勤圏の市町村をモデルとして構築した (表 1)。本論文では、那覇市内へのトリップ数が比較的多い、うるま市以南の沖縄本島中南部の市町村を那覇通勤圏と表現している。

2.2 道路モデル

道路網データは、国土地理院発行の数値地図 1/25000 を基に構築し、道路幅等の情報を基に手作業で通勤に影響が少ないと思われる小路を削除したものをを用いた。作成した道路網データを図 1 に示す。自由流速度、交通容量等の属性は「第 3 回沖縄本島中南部都市圏パーソントリップ調査報告書 [6] (以下、PT 報告書)」を参考に設定した。

2.3 交通需要の推定

交通需要は、PT 報告書の調査時に作成されたマスターデータより自家用車および貨物車のトリップを抽出し作成した。旅行目的は限定せず全目的としている。車両の流入および流出が行われるセントロイドは、特定のノードを作成せず

表 1 地域データのパラメータ

Table 1 Specifications of the model used by the traffic simulation.

ノード数	639
リンク数	2006
リンク総延長	376 km
総トリップ数	1,455,525



図 1 シミュレーションで利用する道路ネットワーク

Fig. 1 the road network of south central Okinawa used by the simulations.

高速道路を除く全ノードから車両の流入が行われることとした。マスタデータには、出発地および到着地の情報（以下、OD）がゾーンと呼ばれる調査単位（地域区分）で記述されておりゾーンより詳細な位置は不明なため、ゾーン内では一様分布していると想定し配分を行った。実際の交通需要は、所要時間等に依存して変動するとされるが、需要に変動を与えるほどの大きな所要時間の変化はおきないと考え OD 交通量を固定として扱う。出発時刻は、マスタデータに従う。

2.4 経路配分

交通の利用者が選択可能な経路の所要コストを知っていると仮定した場合、利用者は最もコストの低い経路を選択する（Wardrop の第 1 原則 [8]）。一方、道路は、利用者が増加するほど渋滞等による所要コストが増加する。そのため、すべての利用者が最短経路を選択した場合、交通の集中により所要コストが増加し、もはや選択された経路は利用者にとって（コストの点で）最短経路ではなくなる。これを繰り返すことで、「それぞれの出発地と目的地の間に複数存在する経路の中で、利用されている経路のコストは等しく、利用されていない経路のコストはそれと等しいか大きい」状態に落ち着くとされており、このような配分は利用者均衡配分と呼ばれている。本研究では、OD 間経路交通量は、利用者均衡配分および積み重ねによる方法 [9] により決定する。

高速道路は、旅行時間に利用コストを時間換算したものを上乗せすることで表現した。

2.5 車両追従モデル

交通流は、ドライバーの振舞いをモデル化した Driver-Vehicle Unit (DVU) を構成要素としたマルチ・エージェント・システムとして表現される。本シミュレータにおける DVU は、Gazis-Herman-Rothery モデル [10] をベースとして先行車両がない場合の加速項と先行車両への衝突を防ぐ減速項を追加したモデルである。詳細は異なるが、PARAMICS [11] が同様のモデルを用いている。また、より現実に即した様々なモデルが提唱されている [12] が、本研究は局所的な渋滞箇所の推定ではなく広域的な旅行時間の推定を目的とするため計算負荷を考慮してシンプルなモデルを採用した。DVU は、以下の 3 つの振舞いをモデル化している。

- 加速状態：前方に十分な空きがあれば最大加速度 A_1 で加速する。
- 減速状態：前方に車両が接近している場合、衝突しないように減速時の最大加速度 A_2 で減速する。
- 追従状態：前方の車間距離が適切な場合、前方車両の速度 $x_0(t)$ に近づける。

渋滞波を再現するための反応遅れ時間 T を導入し、加速

度 $\ddot{x}_1(t+T)$ は次のようになる。

$$\ddot{x}_1(t+T) = aA_1 + bA_2 + (1-a-b)f \quad (1)$$

$$f = \alpha \frac{\{\dot{x}_1(t)\}^m}{g^l} (\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \quad (2)$$

$$a = R \left(\frac{g - D(\dot{x}_0(t), \dot{x}_1(t) + A_1)}{\beta} \right) \quad (3)$$

$$b = R \left(\{D(\dot{x}_0(t), \dot{x}_1(t)) - g\} \frac{\dot{x}_1(t)}{\gamma} \right) \quad (4)$$

$$g = x_0(t) - x_1(t) \quad (5)$$

$$R(z) = \begin{cases} 0 & (z < 0) \\ 1 & (z > 1) \\ z & (other) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $x_0(t)$, $x_1(t)$ は、前方車両の位置、自車の位置、 A_1 , A_2 は、加速時の最大加速度、減速時の最大加速度を表す。 $D(\dot{x}_0, \dot{x}_1)$ は、速度 \dot{x}_1 の車両が加速度 A_2 で減速する前方の速度 \dot{x}_0 の車両に対して安全に停止可能な車間距離、 m , l , α , β , γ は、パラメータである。

g は、前方車両と自車の車頭間隔を表す。 a は、前方のギャップ（空き状況）に応じた加速係数であり、十分にギャップがある場合に 1、ある程度接近すると 0 となる。 β は、ドライバーの加速特性を表しており前方のギャップに対する加速度合いを表す。 b は、減速係数であり、十分にギャップがある場合 0、ある程度接近すると 1 となる。また、速度が高い程前方ギャップに対してセンシティブに減速する。速度に対する応答性を γ で調整する。 f は、Gazis-Herman-Rothery モデルであり、追従状態における速度調整を行う。 R は、飽和関数である。

2.6 交差点モデル

交差点の処理には、全車両が一時停止し、右左折直進に関係なく進行先の路線が開いていれば自由に流入できる交差点モデルを用いた。この方法では、信号の切替えが発生しないため切替えタイミングに渋滞状況が影響されないことがない。通常、交差点には信号機が設置されており時分割で路線間の接続が変化する。信号機のタイミングによって交通渋滞の発生箇所・規模が大きく変化するため、信号による制御を用いる場合は、切替えタイミングについて慎重に検討する必要がある。さらに、右左折専用信号機や時差式信号機等、様々な方式が混在するため、実世界のすべての信号機を正確に再現するのは非常に困難である。

ただし、すべての車両を一定時間交差点で停止させた場合、渋滞時に前方車両の一時停止の影響を受けて後続車量の待ち時間が過剰になってしまうため、本シミュレータでは筆者らが提案した交差点における遅れ時間モデルを導入する。

遅れ時間モデルについて以下に述べる。

- (1) 各リンクについて、リンクの両端間の最短旅行時間 LT_{min} （リンクの最高速度で移動した場合の所要時

間)に信号による平均遅れ時間 D_{sig} を加えた時間 $IT_{min} = LT_{min} + D_{sig}$ を算出しておく。

(2) 車両がリンクに進入してからの経過時間を t_{link} としたとき, $IT_{min} \leq t_{link}$ を満たすまで交差点で一時的に停止する。

後続車両は, 前方車両の一時的停止の影響でリンク内経過時間 t_{link} が伸びるため上記 (2) の停止時間が減少する。そのため, 車両の多少にかかわらず交差点による一定時間の遅れを表現することができる。筆者らは, 予備実験により全車両を一定時間交差点で停止させるモデルと比較して再現性が向上することを確認している。将来的には, Webster's two term formula [13] に従って交差点ごとの待ち時間を算出することで再現性の向上が期待できる。

2.7 現況再現性評価

用意した地域データに対して, リンク交通量, OD 旅行時間, 時間帯別平均旅行時間, 時間帯別 OD 旅行時間の 4 項目について PT 調査との相関を確認することで現況再現性の評価を行った。

2.7.1 パラメータ設定

静的シミュレーション (OD 間交通量の決定まで) を実行するうえで, 「各リンクの交通容量」および「各リンクの自由流速度」が適切に設定されている必要がある。これらのパラメータ設定は, PT 報告書で用いられているものをベースとして, 若干の修正を加えた値を用いている。

一方, ミクロシミュレーションにおいては, 2.5 節におけるパラメータ $T, m, l, \alpha, \beta, \gamma$ を設定する必要がある。本研究では, $T = 1, m = 1, l = 1, \alpha = 0.5, \beta = 5, \gamma = 100\text{km/h}$ とした。また, 2.6 節の遅れ時間 D_{sig} は, 30 秒とした。これらの値は, 試行錯誤的に決定しているため, より高い再現性を示すパラメータが存在する可能性がある。

2.7.2 リンク交通量

2.1 節で述べたシミュレーション環境下で利用者均衡配分を用いて推定したリンク交通量と平成 17 年度道路交通センサスの一般交通量調査 (24 時間) 結果の相関を図 2 に示す。同センサスで調査対象となっている箇所交通量について, 縦軸を観測値, 横軸をシミュレーションによる推定値としてプロットした。測定箇所は 149 カ所, 単位は交通量である。相関係数は 0.95 でありリンク交通量に関して良好な推定結果が得られた。TDM を利用しない一般車両 (4.1.1 項における UE モデル) の経路は, 利用者均衡配分によって推定されたリンク交通量に基づき決定する。ネットワーク全体の交通負荷や平均旅行時間, 渋滞発生箇所等に大きな影響を与えるため, リンク交通量の実観測データとの相関は, シミュレーションの精度を表す良い指標となる。

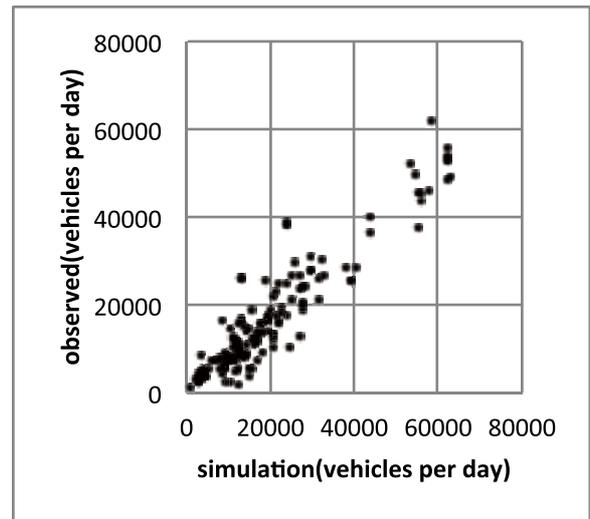


図 2 道路交通センサスのリンク交通量との相関
Fig. 2 Correlation between estimated and observed link traffic.

2.7.3 OD 旅行時間の補正

比較対象となる PT 報告書において調査された OD 旅行時間は, door-to-door の所要時間である。一方, シミュレーションにおいては, ゾーン内のいずれかのノードが出發・目的地となるため, OD 旅行時間が過小評価される傾向がある (ノードは, 比較的大きな通りの交差点に相当する)。特に, 郊外はゾーンが大きく設定されているためゾーン内の移動時間による誤差が大きくなる。そこで, 本評価実験では, ゾーンの形状を円で近似した以下の式によりゾーン内移動距離 d を推定し OD 旅行時間を補正した。

$$d = k\sqrt{S} \tag{9}$$

ここで, S はゾーンの面積, k はゾーン内移動距離の調整係数 (本実験では $k = 2/\pi$) である。

2.7.4 OD 旅行時間

図 3 に, 午前 7 時 30 分から午前 8 時 30 分までに到着した車両のシミュレーションにおける OD 旅行時間と PT 報告書における調査結果との相関を示す。同時間帯に到着する各車両の旅行時間について, 調査結果, シミュレーション結果をそれぞれ縦軸, 横軸としてプロットした。相関係数: 0.79, 平均誤差率: 0.24 であり, おおむね良い相関を示している。PT 調査における旅行時間は, アンケート調査によるものであるため旅行時間の精度にばらつきがあることに注意する必要がある。同時間帯は最も交通量の多い時間帯であるため, 当該時間帯の旅行時間の再現性が高さは, マルチエージェントシミュレーションにおける交通容量が適切に設定されていることを示している。

2.7.5 時間帯別平均旅行時間

時間帯別の平均旅行時間の推定値と測定値 (パーソントリップ調査結果より作成) を図 4 に示す。ピーク時の旅行時間が若干過大であるもののおおむね一致している。ピーク時間外の旅行時間の再現性は, 自由流旅行速度および交

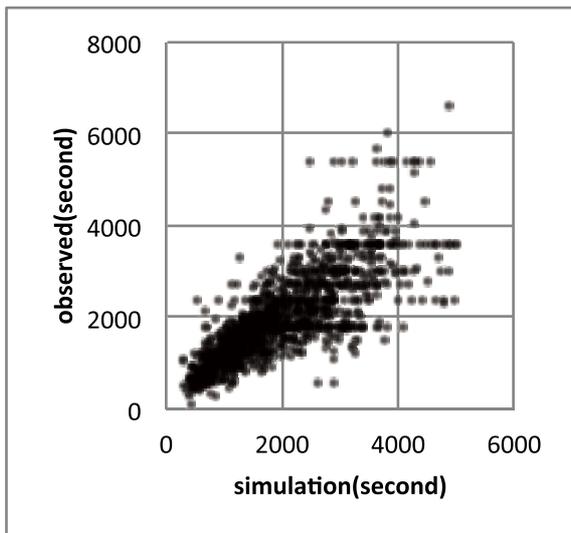


図 3 ピーク時間帯における OD 旅行時間の相関 (7:30~8:30)

Fig. 3 Correlation between estimated and observed trip-time in peak time.

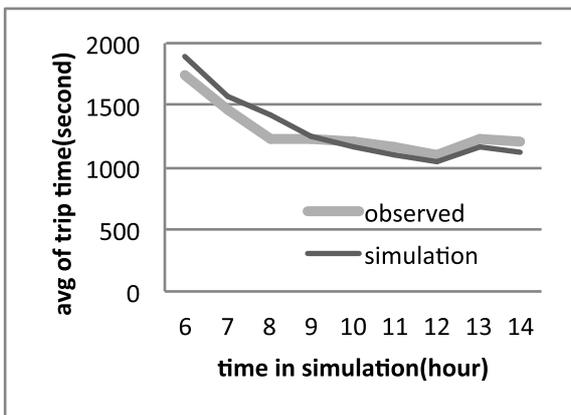


図 4 時間帯別平均旅行時間

Fig. 4 Hourly mean trip time.

差の遅れ時間に対する感度が高いため、これらのパラメータに対する評価と考えることができる。

2.7.6 時系列 OD 旅行時間の相関

図 5 は、シミュレーション中に現在時刻から 1 時間以内に到着した車両の旅行時間と PT 報告書の測定値に対する相関係数および平均誤差率を時系列にプロットしたグラフである。相関係数は、終日 0.70 前後で安定しており、良好な相関を示している。平均誤差率は、0.30 前後で推移していることから推定値と測定値に大きな乖離がない結果となっている。ピーク時間帯、ピーク時間帯ともに相関係数が安定して推移していることから、道路の交通容量、自由流旅行速度、交差点遅れ時間の設定が適切であることが分かる。

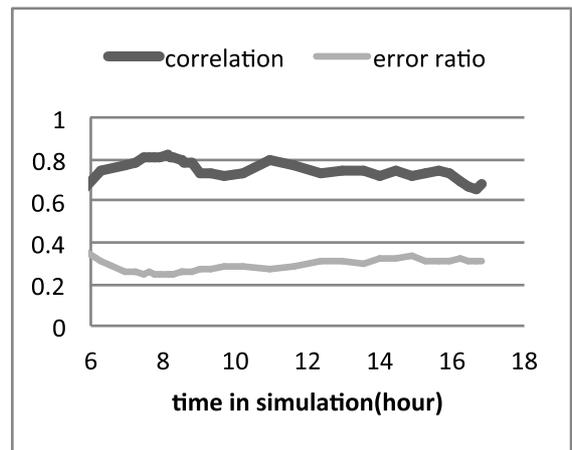


図 5 時系列 OD 旅行時間の相関および誤差率

Fig. 5 Time series correlation coefficient of OD trip time.

3. 旅行計画提示手法

3.1 交通需要マネジメント手法

交通需要マネジメントとは、自動車や公共交通の利用効率を高めるために交通行動の変更を利用者に促す政策であり、既存の交通インフラの利用効率を改善することで混雑の解消を狙うものである。利用者のどの交通行動の変化を促すかにより様々な方策が実施されている。本研究では、このうち「時間帯の変更」および「経路の変更」を利用者に促す手法を提案する。

3.2 実施されている TDM の例

3.2.1 時間帯の変更

朝夕の通勤時間帯等の交通をピーク時間帯外にシフトさせることで、時間的な分散を狙うものである。広島市において平成 7 年より官公庁および民間企業による時差出勤が推進され渋滞長が減少した事例がある [14]。一般的には、行政が企業等にフレックスタイム制の採用を呼びかけたり、職員や民間企業の従業員に対して時差出勤を依頼したりする形で実現されることが多い。

3.2.2 経路の変更

渋滞の激しい路線の利用者に他の経路の利用を促すことで、空間的な分散を狙うものである。平成 9 年に浜松市で行政主導の通勤経路変更実験が行われ一定の成果をあげている [14]。プローブカーや VICS 等の交通情報を利用したカーナビによる迂回も同様の効果を狙ったものであり TDM の一種と考えることができる。

3.2.3 手段の変更

公共交通の利用を促し、自動車交通の減少を狙うものである。パーク&ライド、公共交通の充実、自転車の環境整備等が様々な自治体で実施されている。ただし、利便性の点で劣ることが多いため心理的な抵抗は最も大きいと考えられる。

3.3 提案手法

本論文では、利用者の合理的な判断により経路および時間帯の変更を促すための情報提示方法を提案する。経路の変更に関しては、これまで様々な研究において仮定されているように、現状よりもより所要時間が短い経路を提示することで利用者はその経路を選択するであろうことを期待する。しかしながら、時間帯の変更を促す場合、変更できる余地は限られていると考えられるので、利用者が選択可能な範囲内で出発時刻の提示を行うことが重要である。たとえば、朝の通勤時間帯を想定した場合、一般に出発時刻を早めるほど交通量が減少し所要時間が短くなるが、対価として利用者の自由時間を失うことになる。したがって、失われる自由時間の許容範囲について検討する必要がある。一方、出発時刻を遅らせることができれば自由時間を失うことなく所要時間の減少が期待できるが、(出勤時に限っていえば)通常は始業時間に合わせて出発時刻を決定していると考えられるため後方への調整は困難である。

そこで、本研究では、利用者が受け入れ可能な出発時差の評価指標として所要時間の短縮時間との比較により時差を決定する手法を提案する。提案手法は、移動中の時間とそれ以外の時間は等価ではなく、移動していない時間のほうがより価値が高いと判断する人が多いであろうとの仮定に基づいている。すなわち、以下の条件を満たす場合に、時間帯の変更を受け入れると想定する。

$$x < \alpha y \quad (8)$$

ここで、 x は本来出発すべき時間との時差、 y は、時差 x で出発することで短縮される所要時間。 α は、移動の有無による時間価値の係数である。

3.4 想定する情報提示システム

提案手法は、毎日、同時刻、同経路で通勤または通学するドライバを利用者として想定している。利用者は、あらかじめ出発予定時刻、出発地、到着地をシステムに入力しておく。初回利用時は、情報提示を受けずにこれまで利用していた経路で通勤を行い、基本所要時間を計測する。2回目以降は、3.6 節に述べる手法により式 (8) を満たし、最短時間で移動できると推測される出発時刻および推定所要時間を携帯端末に提示し、かつ 3.5 節で述べる計測手法により得られる再短時間経路を提示する。

3.5 所要時間の計測

TDM として上記のような行動変化が利用者や社会に利益をもたらすためには、行動変化の結果が交通網に与える影響を正確に予測し信頼性の高い情報を利用者に提示することが重要である。TDM により利用者が得られる利益は「旅行時間の減少」であるため、利用者の自発的な行動変化を促すためには、旅行時間を高精度に推定し利用者が得ら

れる利益を正確に予測する仕組みが必要となる。そこで、本研究では、スマートフォンに代表される位置情報計測機能付き通信デバイスが普及し、一定割合の車両がプローブカーとしてリンク旅行時間を計測および情報提供している状況を想定する。1分ごとに交差点を通過する車両のリンク所要時間を集計し平均値がリンク所要時間として共有される。1台も車両が通過しなかった場合は、自由旅行時間をリンク所要時間とする。さらに5分ごとに集計を行い時間帯別リンク所要時間(蓄積データ)として保存しておき、翌日に時間帯別リンク所要時間の予測値として利用する。

3.6 出発時刻の決定

3.5 節で述べたように、プローブカーにより時間帯ごとの全リンクの所要時間が測定され記録されているのでこれらの蓄積データを用いることで出発時間帯を変更した場合に短縮される所要時間を予測することが可能である。以下の手順により利用者に提示する出発時刻を決定する。

- (1) 現在時刻から n 分以内に出発する車両を抜き出す。
- (2) 現在時刻から利用者が入力した出発予定時刻まで p 分刻みで出発時刻を x 分だけ早い方にシフトした場合の所要時間を算出し、3.4 節の基本所要時間との差を y とする。ただし、シフト時の所要時間が基本所要時間を上回る場合は、 $y = 0$ とする。
- (3) 式 (8) を満たし、 y が最大となるような x を求める。
- (4) 出発予定時刻を x 分早めた時刻、推定所要時間、推定最短時間経路を利用者に提示する。また、 $n = 30$ (分)、 $p = 5$ (分) とした。

α の値には、議論の余地がおおいであろうと思われるが実験的に本研究では $\alpha = 2$ とした。

4. シミュレーション実験

4.1 行動変更モデル

利用者の行動変更モデルとして3種類のケースを想定し、シミュレーション実験を行った。行動変更モデルの詳細を以下に述べる。

4.1.1 利用者均衡モデル (UE)

利用者均衡配分 (User Equilibrium: UE と表記) の結果として得られた経路を選択し、途中で経路の変更は行わない。出発時刻は入力データ(パーソントリップ調査)に従う。UE モデルは、TDM に参加しない一般的な利用者をモデル化したものである。最短経路ではなく、2.4 節で述べた均衡状態における経路を選択する。最短経路のみを利用するモデルと比較して、より多くの経路が利用されるので局所的な激しい渋滞が発生しにくくなる。一方、OD 間で利用される経路の旅行時間はほぼ等しくなるため、迂回のメリットが失われ、後に述べる動的に経路を選択するモデルの有効性は減少すると考えられる。

利用者均衡配分は、多くの交通シミュレータで利用され

ており多くの実務において現況再現性の高さが確認されている。したがって、より現実に近い交通状況が再現できる。

4.1.2 最短時間経路モデル (ST)

最短時間経路モデル (Shortest Time Route : ST と表記) の車両は、3.5 節で述べた仕組みにより得られたリンク所要時間から得られる最短時間経路を選択する。交差点に到達するたびに経路の再探索を行うので経路が動的に変化する。

4.1.3 時差出勤モデル (SS)

時差出勤モデル (Staggered Shifts : SS と表記) は、TDM による時差出勤を受け入れている利用者をモデル化したものである。3.3 節で述べた手法により提示された時刻に出発する。ただし、正確に提示された時刻に出発することは現実的ではないので、提示時刻を平均とした正規乱数で得られる時刻に出発する。乱数の標準偏差は試験的に 5 分とした。出発直前にその時点のリンク所要時間を用いて得られた最短時間経路を選択する。また、時差出勤の効果を確認するため ST モデルと同様に、交差点に到達するたびに経路の再探索を行うモデルとした。

4.2 普及にともなう有効性の評価

リンク所要時間を計測するプローブカーが 30% 存在している状況で、ST, SS の存在比率を変更しそれぞれの行動変更モデルの有用性を考察する。プローブカーは、リンク所要時間の計測および情報提供に同意している車両である。行動変更モデルとは関係なく 30% 存在している*1とした。SS モデルは、前日の時間帯別リンク旅行時間 (シミュレーションにおいては 1 つ前のシミュレーション時の旅行時間) を利用するため、試行回数により旅行時間が若干変化する。本実験では、4 回試行し平均値を用いた。

4.2.1 システム利用者の平均旅行時間

平均旅行時間の変化は、相対的な道路の利用効率の変化を示す重要な指標であるため、図 6 に、行動変化モデル別、混在率別の平均旅行時間を整理した。SS, ST が同時に存在しているのではなく、それぞれが 0% から 70% 存在し残りすべてが UE モデルである状況下の SS および ST モデルの平均旅行時間を示している。混在率 0% とは、すべて UE モデルで構成される道路状況であり、TDM を導入していない状況での旅行時間となる。グラフから、混在率 10%, 30%, 50% の状況では SS モデルの利得が大きいことが分かる。また、SS, ST モデルともに、混在率が一定以上増加すると旅行時間が改善されないという結果となった。

4.2.2 社会全体の平均旅行時間

図 7 は、4.2.1 項と同様の統計をシミュレーション中の

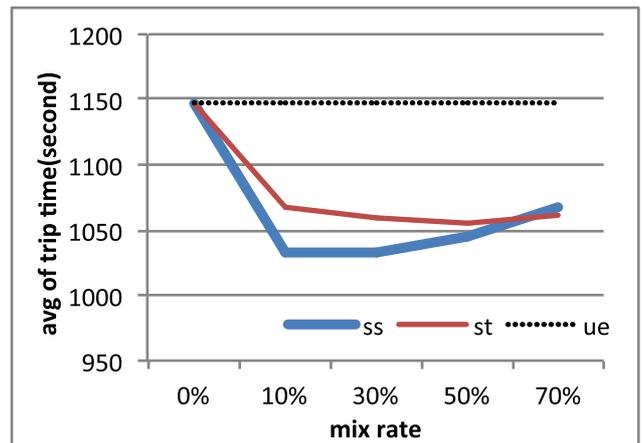


図 6 行動変更モデル別、存在比率に対するシステム利用者平均旅行時間 (秒)

Fig. 6 Mean trip time (second) of each behavior changing model for mix rate.

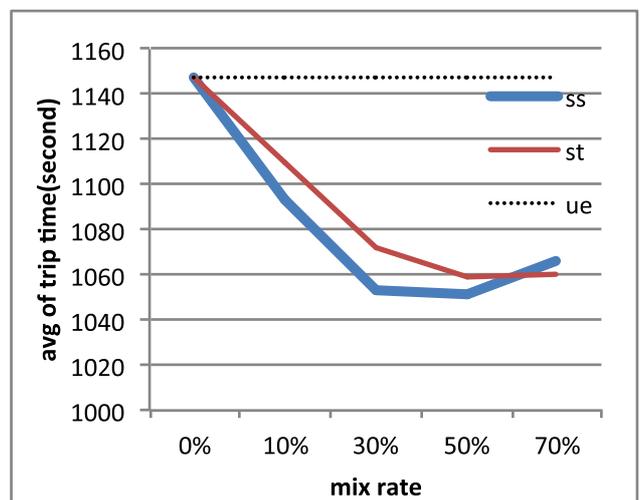


図 7 行動変更モデル別、存在比率に対する全体平均旅行時間 (秒)

Fig. 7 Mean trip time (second) of each behavior changing model for mix rate.

すべての車両の平均旅行時間について実施したものである。UE モデルのみの平均旅行時間と比較することで社会全体で得られる利得を考察できる。SS モデルは、システム利用者の利得が混在率の上昇にともない悪化しているのに対して、社会全体の利得は 50% がピークとなっている。

4.3 出発時間帯別利得

図 8 は、SS モデルまたは ST モデルが 30% 存在している状況で、出発時間帯別に全車両 (SS モデルおよび ST モデルを含む) が得られる利得 (すべてが UE モデルである状況に対して短縮された所要時間) を示す。全モデル共通して早朝に出発する利用者の利得が少ないのは、早朝時間帯は交通量が少ないため迂回効果が少ないためであると考えられる。一方、混雑のピーク時間帯である 7 時から 8 時台は、SS, ST とともに大きく旅行時間が改善される結果

*1 予備実験において、プローブカーの存在割合を 10%, 30%, 50%, 70% として ST モデルの平均旅行時間を算出したところ、旅行時間にほとんど変化が見られなかったことから、本実験では 30% 存在する状況を想定した。

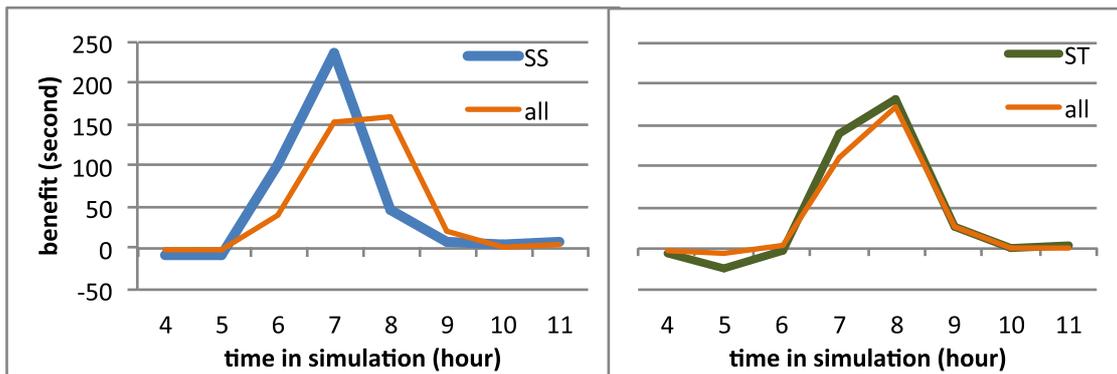


図 8 左：SS モデルと全車両の時間帯別利得，右：ST モデルと全車両の時間帯別利得 (ともに混在率 30%，all は SS または ST モデルを含む全車両)

Fig. 8 Left : Hourly benefit of SS model and all of vehicles, right: Hourly benefit of ST model and all of vehicles (mix rate:30%).

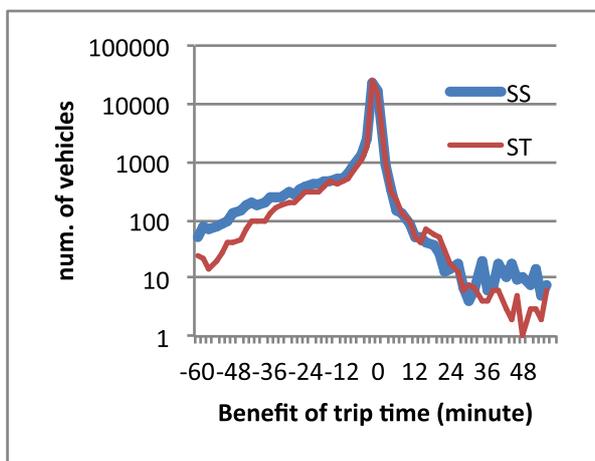


図 9 利得の分布

Fig. 9 Histogram of amount of trip time benefit.

となった。

また、SS モデルは、出発時刻が早くなるため 7 時台の旅行時間が大きく改善されているが 8 時台の利得は減少している。車両全体の利得は、ST モデル混入時と比較して 8 時台の利得はほぼ同等である一方で、7 時台の利得が高いことから時差出勤の効果が現れていると考えられる。

4.4 利得の分布

SS, ST 両モデルの特性を見るために、利用者が得られる利得の分布を図 9 に示す。縦軸は車両台数 (対数表示)、横軸は、旅行時間の変化 (分) を表している。SS モデルは、旅行時間が大きく改善された利用者が多い反面、旅行時間が増加した割合も多いことが分かる。

4.5 変更された出発時刻の分布

SS モデルは、出発時間を変更することで旅行時間の短縮を図るモデルであるが、変更された時間は利用者にとっては損失であると考えられることもできる。図 10 は、システム

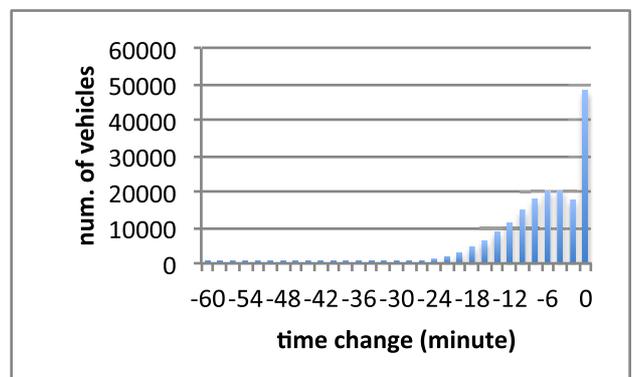


図 10 出発時刻の変化の分布

Fig. 10 Histogram of amount of departure time change for SS.

の提案時刻を考慮して実際に出発した時差の分布を示す。評価実験では、5 分単位で時差出勤を提案するシステムを想定しているが、SS モデルは、システムの提案時刻に対して正規分布の誤差を含む時刻に出発するため、図 10 のような結果となっている。

結果から 5 分前後の時差出勤を行った利用者が最も多いことが分かる。一方、24 分以上の時差出勤はほとんど行われていない。

5. 考察

図 6, 図 7 は、存在割合が 50% を下回る状況において、SS モデルが ST モデルに対して有効性が高いことを示している。一方で、SS モデルの普及率が 50% を超えると SS モデル利用者の利得が減少し、70% を超えると社会全体の利得が減少する。混在率が高い場合、多くの車両が同一の渋滞情報に基づいて迂回することで、迂回路が渋滞し、かえって旅行時間が長くなる状況に陥っていると考えられる。従来研究でも同様の報告 [15] があり、経路情報を共有することで副次的な渋滞を回避する試みも行われている [1]。提案手法においても、同一情報に基づき出発時刻を変更する

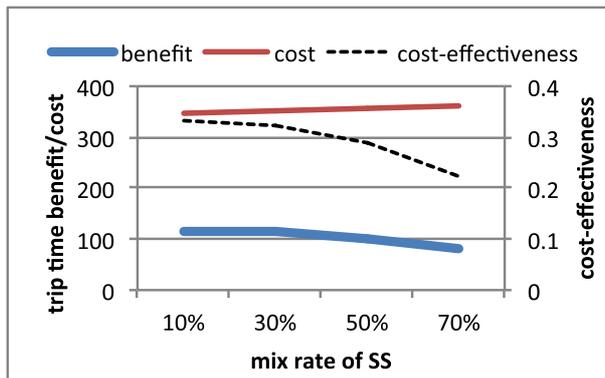


図 11 SS モデルの混在率別コスト (秒)・利得 (秒)・費用対効果
 Fig. 11 Cost-effectiveness, cost and benefit for mix rate of SS.

ため同一時間帯に時間的な意味での迂回車両が集中し旅行時間の改善が見られなくなったと考えられる。空間的だけでなく、時間的な集中の回避も今後の課題である。

図 11 は、SS モデルの混在率別のコスト (平均時差)、利得 (短縮された旅行時間の平均)、費用対効果 (利得/コスト) を示している。SS モデルは、混在率の上昇にともない利得が減少しコストが若干上昇するため、普及にともない費用対効果が悪化するという結果となった。これも、前述したような時間的な集中の回避を行うアルゴリズムを開発することで回避できると考えられる。また、費用対効果の逆数は、3.6 節の α に相当する。実験では、 $\alpha = 2$ としたが、結果は 3~4.5 となっておりシステムが提示した時刻に出発しても必ずしも提示された利得が得られていないことを示している。現段階では、単純に前日のリンク所要時間に基づき時差出勤時の旅行時間を推定しているが、他の利用者が時差出勤することで蓄積されたリンク所要時間と実際の時間に誤差が生じるため、全利用者の時差を考慮して最適な出発時刻を決定することが必要である。

一方、時間帯別の利得 (図 8) から混雑時間帯に通行する利用者は大きな利得を得ていることが分かる。グラフとして示してはいないが、コスト (出勤時差) は時間帯にかかわらず一定の値であった。このことから、交通状況により費用対効果の増減があると考えられる。したがって、交通状況により提示する時差を調整し、費用対効果の低い時間帯については、時差出勤を行わず空間的分散のみを指示することで全体の効用を増加させることができるかもしれない。

本研究では、通勤・通学を対象としたシステムを想定したが、旅行目的によっては出発時刻に関する自由度が比較的高いもの (たとえばレジャー、買い物等) もあるため、旅行目的別に出発時刻の調整幅を変動させることも現実的であると思われる。

今後、TDM に対する社会の理解が進みフレックスタイム制を導入する企業が増加するならば、出発時刻を遅らせることによるピークシフトも可能であると考えられる。こ

のような状況を想定した実験についても今後進めていく必要がある。

6. おわりに

本論文では、多数のプロブカーにより旅行時間がある程度推定可能な状況下において、適切な出発時刻および経路を利用者に提示することで時間・空間的に交通の負荷分散を促す手法を提案した。提案手法の効果を検証するため、空間的な分散のみを行う最短時間経路モデルを用意し、沖縄県那覇市通勤圏をモデルとして構築した地域データを用いたシミュレーション実験により効率性について比較を行った。提案手法の旅行時間の短縮効果、出発時刻の変更の程度について検証することで有効性を確認した。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 23760356 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 山下倫央, 車谷浩一, 中島秀之: 交通流の円滑化に向けた協調カーナビの提案, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.177-188 (2008).
- [2] 金森 亮, 高橋 淳, 伊藤孝行: 予見的情報に基づく経路割当戦略に関する研究, 電気学会論文誌 C (エレクトロニクス特集号), No.9, pp.1645-1651 (2013).
- [3] Chen, B. and Cheng, H.H.: A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.11, No.2, pp.485-497 (2010).
- [4] 沖縄県: レンタカー観光調査報告書 (2005).
- [5] 伊志嶺拓人, 赤嶺有平, 遠藤聡志: 通勤車利用型カーシェアリングシステムによるモーダルシフト効果のシミュレーション分析, 情報処理学会論文誌, Vol.51, No.10, pp.1986-1994 (2010).
- [6] 沖縄本島中南部都市圏総合都市交通協議会: 第 3 回沖縄本島中南部都市圏パーソントリップ調査報告書 (2009).
- [7] Xing, J., 越正 毅: 高速道路のサグにおける渋滞現象と車両追従挙動の研究, 土木学会論文集, No.506/IV-26, pp.45-55 (1995).
- [8] Wardrop, J.G.: Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, *ICE Proc. Engineering Divisions*, Vol.1, pp.325-378 (1952).
- [9] 土木学会: 道路交通需要予測の理論と適用 (2006).
- [10] Gazis, D.C., Herman, R. and Rothery, R.W.: Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow, *Oper. Res.*, Vol.9, pp.545-567 (1961).
- [11] Fritzsche, H.-T.: A model for traffic simulation, *Traffic Engineering and Control*, pp.317-321 (1994).
- [12] 大口 敦: 高速道路単路部渋滞発生解析—追従挙動モデルの整理と今後の展望, *Proc. JSCE 660*, pp.39-51 (2000).
- [13] 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法, p.57 (1998).
- [14] 国土交通省: TDM の事例, 入手先 (<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/tdm/Top03-01-04.html>).
- [15] 棚橋 巖, 北岡広宣, 馬場美也子: 広域交通流シミュレータ NETSTREAM, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.37, No.2, pp.47-53 (2002).



赤嶺 有平 (正会員)

2004年琉球大学大学院理工学研究科博士課程総合知能工学専攻修了。博士(工学)。同年日本学術振興会特別研究員。2006年琉球大学工学部情報工学科助手。2007年から同助教。交通システム、複合現実感の研究に従事。人工知能学会、地理情報システム学会各会員。



遠藤 聡志 (正会員)

1990年北海道大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年北海道大学工学部助手。1995年琉球大学工学部情報工学科講師。1996年同助教。2004年同教授。複雑系工学に関する研究に従事。人工知能学会、計測自動制御学会、日本知能情報ファジィ学会各会員。博士(工学)。



上原 和樹

2013年琉球大学大学院理工学研究科情報工学専攻修士課程修了。現在、同研究科総合知能工学専攻博士課程。交通シミュレーションに関する研究に従事。



根路銘 もえ子 (正会員)

2001年琉球大学大学院理工学研究科総合知能工学専攻博士課程修了。博士(工学)。2001年通信・放送機構沖縄RC招聘研究員。2003年沖縄国際大学商経学部経済学科講師。2004年沖縄国際大学経済学部地域環境政策学科講師。2005年から同准教授。進化型計算、観光情報システムの研究に従事。人工知能学会、計測自動制御学会各会員。