

高度交通管理を考慮した日々の学習過程と動的交通行動分析*

柳沢吉保**・高山純一***・中沢伸樹****・飯田恭敬*****

Analysis of Day-to-day Learning Processes and Travel Choice Dynamics in Traffic Networks Considering Real-time Information and Signal Control

Yoshiyasu YANAGISAWA, Jun-ichi TAKAYAMA, Shinju NAKAZAWA and Yasunori IIDA

A day-to-day dynamic framework is developed to study network dynamics under real-time information and responsive signal control systems. Two level of tripmaker decision-making processes are incorporated: (1)day-to-day dynamics and (2)real-time dynamics. In day-to-day dynamics, each driver uses a disutility function of perceived travel time and perceived schedule delay to evaluate the alternative travel choices, then selects an alternative based on the utility maximization principle. Day-to-day dynamics are governed by tripmaker's daily learning processes. Learning model, applied the Bayesian theorem, consider the travelers update their travel time perceptions form one day to the next in light of information provided by ITS and their previous experience. Real-time dynamics consider en-route switching decisions in response to real-time information on prevailing traffic conditions. Traffic control are evaluated by the actuated control.

The framework is illustrated through numerical experiments to investigate the day-to-day evolution of network flows under real-time information and responsive signal control, and assess the effectiveness of such information in a proper dynamic perspective.

キーワード：ITS, 動的交通行動, 所要時間更新, 学習過程, ベイズの定理, 効用最大化理論

1. まえがき

動的経路誘導システムを導入することで、ドライバーを適宜経路誘導し、都市ネットワークの渋滞を緩和することが期待されている。一方、交通渋滞は交差点容量の不足が影響する場合が多いため、ネットワーク上に存在する信号交差点も考慮し、流入フローの制御を行う必要がある。近年、情報提供に対するドライバーの経路選択特性に関する分析は行われているが、情報提供と信号交差点流入制御の両面を考慮した渋滞緩和効果の分析評価は十分行われていない。既往の研究として高山ら¹⁾は、都市ネットワークの信号交差点で発生する渋滞を考慮した交通量配分の動的化を行っている。動的フローシミュレーションモデルを用いた経路誘導効果の評価分析が

飯田ら²⁾によって先駆的に行われた。Mahmassaniら³⁾は、リアルタイム情報提供下での、信号制御を考慮した日々のネットワークフローの評価を行っている。しかし過去の走行経験も日々の経路選択に大きな影響を与えると考えられるが、この点が明確にモデル化されていない。M Jha⁴⁾らは過去の走行経験と提供情報による予測所要時間の学習過程を考慮した日々の動的交通行動シミュレーションモデルを開発している。しかし信号制御による交差点容量の変化までは分析されていない。

以上を考慮し本研究では、(1)過去の走行経験の学習による知覚所要時間の更新、(2)提供情報に対する依存度を考慮した知覚所要時間の修正、(3)信号交差点での道路容量の変化、を考慮した動的ネットワークフローの評価システムの開発を試みた。

2. 日々の動的シミュレーションのフレームワーク

本研究における動的ネットワークフロー評価システムは、図1に示すように「日々の動的選択行動」

* 第22回土木計画学研究発表会・講演集にて一部発表

** 長野工業高等専門学校環境都市工学科助教授

*** 金沢大学工学部土木建設工学科教授

**** 新潟大学工学部建設学科学生

***** 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻教授

原稿受付 2000年9月29日

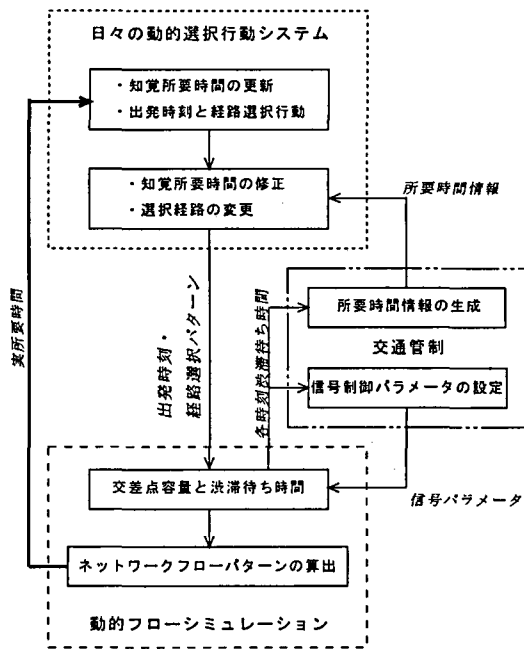


図1 動的ネットワークフローの評価システム

・「動的フローシミュレーション」・「交通管制」の3つのシステムから成っている。

日々の動的選択行動システムでは、①ドライバーは前日までの走行経験に基づいた利用経路の混雑状況を学習し、知覚所要時間の更新を行う。②知覚所要時間に基づいて利用経路を選択する。とくに通勤など始業時刻が存在するトリップの場合、出発時刻も選択する。③さらに情報利用者は、出発時あるいは走行途中に交通管制システムから提供された所要時間情報を考慮し、知覚所要時間を修正し、選択経路の変更を行う。以上①～③までの考え方を基にしたモデルを用いて、各OD、経路の出発時刻分布を算出する。

動的フローシミュレーションシステムでは、信号制御に伴うリンク末端の容量変化や、リアルタイム情報提供による経路変更行動に対する渋滞の時刻変化を評価する。そこで短い時間間隔で変化するリンク交通量を扱う一般リンクは、とくに①フローは下流側のトリップ数の影響は受けるが、上流側のトリップ数の影響は受けない。②リンクを移動しているフローはリンク容量を超えない、などの条件を満たす。また交差点から上流側へ延伸する渋滞を扱う交差点リンクは、③ある時刻の交差点流入フローの方が交差点容量よりも小さければ、同時刻に下流リンクに流出させる。④流入フローの方が大きければ交差点容量を超過した分だけ交差点リンクに残留させ、次時点以降に下流リンクに流出させる。一般リンク、交差点リンクともにFIFOの原則は保持する、など

の条件を満たしながら、一般リンクフローと交差点リンクフローの時刻変化を表現できるボックス型交差点フローアルゴリズム⁵⁾を適用する。

交通管制システムでは、ドライバーの適正な経路誘導を促すため、道路交通状況の把握・データの収集・加工に基づいたドライバーへの情報提供と信号制御の2つのサブシステムからなっている。情報提供と信号制御のための道路交通状況の把握は、①前日までや当日の前時刻までの実所要時間データが収集されている。②ピーコンを介して、これから交差点に流入する、あるいは交差点から流出するフローの状況、さらには各車両の目的地や利用予定経路が把握される。本システムでは、目的地別の各時刻・各経路の実所要時間と、交差点に残留している、あるいは次時点に交差点に流入する交通量はフローシミュレーションに基づいて得られる。

3. 日々の動的選択行動のモデル化

(1) 知覚所要時間更新のモデル化

ドライバーが n 日目の行動を決定するために知覚する目的地までの所要時間 ζ は、前日までに経験した実所要時間 $\tau^{n-1}=(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1})$ に基づいていると考えられる。知覚した所要時間に基づいて行動した結果、実際に生じた所要時間が τ_n とする。ドライバーが $n+1$ 日目に知覚する所要時間は、実際に生じた所要時間 τ_n と前日までに生じた τ^{n-1} による、 τ_n に基づいて行われると考えられる。このように日々繰り返されるトリップによって所要時間を学習することで、対象道路網の渋滞状況がしだいに明らかになる。ここでは学習過程プロセスにベイズの定理を適用する。そこでドライバーの知覚する所要時間のばらつきを正規分布で近似し、 n 日目における知覚所要時間の確率密度関数 $p(\zeta|\tau^{n-1})$ は $N(\zeta_n, \sigma_{\tau_n}^2)$ に従うとする。また、実所要時間は知覚所要時間まわりに分布すると仮定すると、 n 日目の実所要時間の確率密度 $p(\tau_n|\zeta)$ は $N(\zeta, \sigma_\tau^2)$ に従うとする。実所要時間 τ_n を得ることで、 $(n+1)$ 日目の知覚所要時間の確率密度関数 $p(\zeta|\tau^n)$ は $N(\zeta_{n+1}, \sigma_{\tau_{n+1}}^2)$ に従うとする。以上の確率密度関数を(1)式のベイズの定理に適用する。

$$p(\zeta|\tau^n) = \frac{p(\zeta|\tau^{n-1}) \cdot p(\tau_n|\zeta)}{\int p(\zeta|\tau^{n-1}) \cdot p(\tau_n|\zeta) d\zeta} \quad (1)$$

知覚所要時間 ζ の期待値と分散を以下に示す。

$$\zeta_{n+1} = \zeta_n + \frac{\tau_n - \zeta_n}{\sigma_{\tau_n}^2 + \sigma_\tau^2} \cdot \sigma_{\tau_n}^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{\tau_{n+1}}^2 = \sigma_{\tau_n}^2 - \frac{\sigma_{\tau_n}^4}{\sigma_{\tau_n}^2 + \sigma_r^2} \quad (3)$$

分散を示す(3)式を見ると、右辺第2項の符号が正であることから、経験回数 n が増すほど、分散の値が小さくなることわかる。これは走行経験が増し、実所要時間情報が蓄積されるほど知覚のばらつきが小さくなり、交通状態が明らかになることに対応する。期待値を示す(2)式では、右辺第2項は知覚と実所要時間の差と、知覚の分散からなる。知覚と実所要時間差が小さくなれば、右辺第2項はゼロに近づき、日々の知覚所要時間の変化は小さくなる。また走行経験回数が増すと、分散はゼロに近づくことから、やはり右辺第2項が小さくなり、知覚所要時間の変化が小さくなる。

経路あるいは出発時刻選択行動は、以上の特性を持つ知覚所要時間に基づいた交通選択行動モデル⁶⁾により求める。

(2) 所要時間情報による知覚所要時間の修正

情報提供を受けるドライバーは、走行途中で提供される情報に基づき、出発前に知覚した所要時間を修正する。前節の通り、 $N(\zeta_n, \sigma_{\tau_n}^2)$ に従う出発前の知覚所要時間の確率密度 $p(\zeta | \tau^{n-1})$ は、走行途中で提供される所要時間情報 λ によって、知覚所要時間は $N(\tilde{\zeta}_n, \tilde{\sigma}_{\tau_n}^2)$ に従う確率密度 $p(\zeta | \tau^{n-1}, \lambda)$ に変更される。情報所要時間は実所要時間に基づいて提供されるため、実所要時間の平均値まわりに分布すると考えられ、情報所要時間の確率密度 $p(\lambda)$ は $N(\bar{\tau}, \sigma_\lambda^2)$ に従うとする。ここで、 n 日目の知覚所要時間 ζ と情報所要時間 λ の同時確率 $p(\zeta, \lambda | \tau^{n-1})$ は、(4)式あるいは(5)式の関係がある。

$$p(\zeta, \lambda | \tau^{n-1}) = p(\zeta | \tau^{n-1}, \lambda) p(\lambda) \quad (4)$$

$$p(\zeta | \tau^{n-1}, \lambda) = p(\zeta, \lambda | \tau^{n-1}) / p(\lambda) \quad (5)$$

式(5)より、情報提供後に更新された知覚所要時間の期待値は式(6)で、分散は(7)式で表される。

$$\tilde{\zeta}_n = \zeta_n + \rho \cdot \frac{\sigma_{\tau_n}^2}{\sigma_\lambda^2} (\lambda - \bar{\tau}) \quad (6)$$

$$\tilde{\sigma}_{\tau_n}^2 = \sigma_{\tau_n}^2 (1 - \rho^2) \quad (7)$$

式(6)、(7)の ρ は ζ と λ の相関係数であり、知覚所要時間の修正における提供情報への依存度と解釈する。したがって ρ の値が大きいとき、情報 λ が大きめであれば、知覚所要時間は大きめに修正する。もし ρ の値が小さければ、提供された情報はあまり関係せず、知覚所要時間は大きく修正されることはない。知覚の分散は、情報に対する依存度 ρ が大きいほど情報提供後の分散は小さくなる。ドライバーは修正された所要時間の短い経路に変更する。ただし情報提供を受けないドライバーは、前節(1)で示したよう

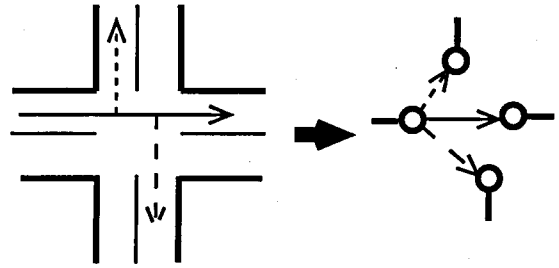


図2 交差点のリンク化

に、過去の走行実績のみで知覚する所要時間に基づいて経路選択などを行う。

4. 動的フローシミュレーション⁸⁾

交通需要の時刻変化に対応したネットワークフローを表現する。ネットワークは一般リンクと交差点における交差点リンクで構成する。一般リンクフローは、リンク所要時間が自由走行時間と遅れ待ち時間で表すことができるので、リンクを自由走行箱と遅れ待ち箱により構成する⁹⁾。箱には容量制約が設けられていて、渋滞のように容量以上の交通量がかかった場合は、自由走行箱の最後端の箱以降の空いている部分にフローを埋めていく。箱の中のフローは単位時刻ごとに進行方向側の箱に1つだけ移動させる。リンク所要時間は通過した箱の数を数えることによって求まる。以上のルールを一般のリンクフローに当てはめる。

交差点における交差点リンクは図2に示すような右左折直進リンクで構成する。飯田ら⁹⁾により右左折直進を考慮したモデル化が行われているが、ここでは短い時間間隔で離散化された各時点に対応した信号サイクルに基づく交差点容量の設定を考慮したアルゴリズムを明示する。とくに①信号サイクルに基づいて各時点ごとに容量を設定できる、②設定した容量に応じて交差点で残留していたフローと上流リンクから流入してきたフローを下流リンクへ移す量を算出できる、③FIFOの原則を保持できる、ことを考慮したアルゴリズムを明示する。

ある時点で交差点の上流側リンクから流入したフローは交差点リンクの空き箱にすべて移す。先に交差点に流入したフローが先に交差点を流出させるため、1つの箱に異なる時点で流入したフローは存在させない。そこで交差点リンクには容量制限のない箱を複数存在させる。また交差点への流入フローは交差点流出容量よりも大きくない限り交差点で滞留しないことを考慮し、以下のアルゴリズムで交差点内のフローを動的に表現する。まずある時間帯内の K 時点目の初期状態を図3.1に示す。この例におい

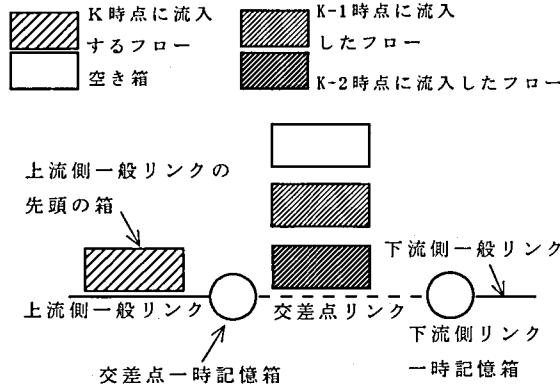


図3.1 K時点の交差点リンクの初期状態

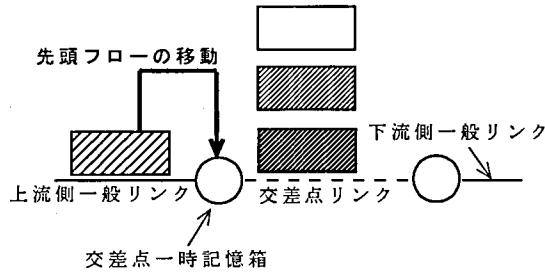


図3.2 K時点の上流側リンク先頭のフローの移動

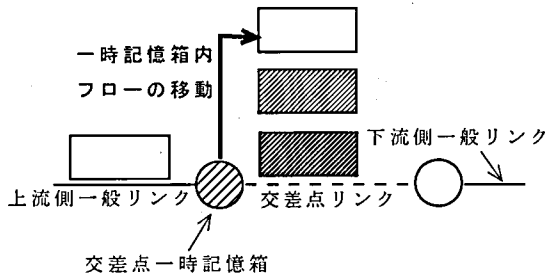


図3.3 K時点の交差点一時記憶箱のフローの移動

て交差点リンクには時点K-2, K-1に上流側リンクから流入し, K-1時点まで交差点で残留しているフローがあるものとする。

ステップ1: 図3.2に示すように, 交差点リンクの一時記憶箱に, 上流側リンクの先頭の箱のフローをすべて移す。

ステップ2: 交差点リンクの箱に容量制限を設けないので, 図3.3に示すように, 交差点リンクの空き箱の先頭に, K時点に流入した一時記憶箱の中のフローをすべて移す。

ステップ3: 図3.4に示すように, 交差点リンクの先頭の箱内のフローを, 単位時間当たりの交差点流出容量Cと等しくなるまで下流側のリンクの一時記憶箱に移す。もし先頭の箱内のフローよりも交差点流出容量Cの方が大きければ2番目以降の箱内のフローも順番に下流側の一時記憶箱に移す。

ステップ4: 交差点リンクの先頭の箱に空きが生じ

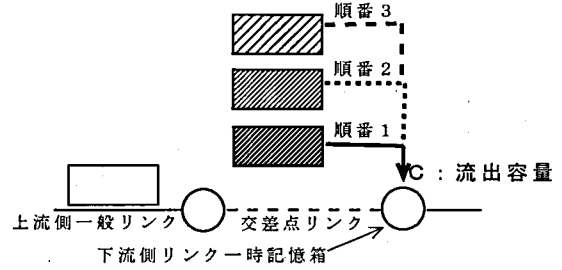


図3.4 K時点の交差点リンクフローの移動

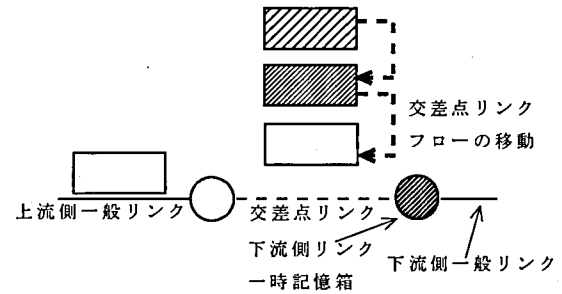


図3.5 K時点の交差点リンクフローの移動

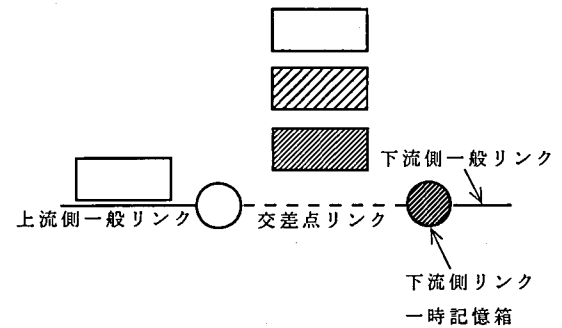


図3.6 K時点における交差点リンクフローの最終状態

たら, 他の箱内に残留しているフローを空き箱に順次移す。このときFIFOの原則を保持するため, 同一の箱に異時点流入フローが混在しないようにする。図3.5は交差点リンクの先頭のフローがすべて下流側リンクへ流出した場合である。

以上のアルゴリズムによる交差点リンクフローのK時点の最終状態を図3.6に示す。下流側リンクの一時記憶箱内のフローはこのK時点内に一般リンクの箱に移される。

以上のアルゴリズムにより, 交差点に流入するフローと交差点で残留していたフローの和が交差点流出容量よりも大きければ, 交差点から上流側へ渋滞が延伸する状態を再現し, 小さければ交差点に残留することなく通過し, 下流リンクに移る。

5. 信号サイクルと交差点容量

ここでは図2で示した信号交差点の各流入部より流入する交通量に応じて信号サイクルや青時間を設

定する感応制御を行う。また各交差点ごとに信号制御を行う地点制御方式を適用する。以下本分析において行う流入フローを考慮した信号サイクルと青時間の設定と、信号制御に基づいて変化する交差点容量について説明する。

(1) 信号サイクルおよび青時間の算出⁷⁾

現示 i におけるリンク l の正規化交通量 θ_l^i は次式により求めることができる。

$$\theta_l^i(t) = \frac{Q_l^i(t)}{S_l^i} \quad (8)$$

$Q_l^i(t)$ は時点 t にリンク l から交差点に流入する実交通量で、 S_l^i はリンク l の飽和交通流率である。同様にして現示 j にリンク l から流入するフローの正規化交通量 $\theta_l^j(t)$ を求める。現示 i の飽和度は次式により算出する。

$$\theta_i^*(t) = \max_l \theta_l^i(t) \quad (9)$$

同様にして算出した現示 j の飽和度が θ_j^* とすると交差点飽和度は次式で得られる。

$$\eta(t) = \theta_i^*(t) + \theta_j^* \quad (10)$$

以上より時点 t の信号周期長 $S_c(t)$ と青時間 $G_1(t)$ は次式により算出する。

$$S_c(t) = \frac{1.5L + 5}{1 - \eta(t)} \quad (11)$$

$$G_1(t) = (S_c(t) - L) \times \frac{\theta_i^*(t)}{\eta(t)} \quad (12)$$

ただし、信号周期長の最大値は120~180秒なので、この範囲内で設定する。

(2) 交差点の交通容量

時点 t において現示 i に交差点に流入するフローに対する交差点容量 $C_1(t)$ は前項(1)で算出した信号周期長と青時間を用いて次式で表すことができる。

$$C_1(t) = S_l^i \times \frac{G_1(t)}{S_c(t)} \quad (13)$$

現示 j の青時間は、信号周期長から現示 i の青時間および黄時間 Y を減じることで得られるので、次式より算出した。

$$C_1(t) = S_l^j \times \frac{S_l^i(t) - G_1(t) - Y}{S_c(t)} \quad (14)$$

S_l^j は現示 j リンク l の飽和交通流率である。

(3) ビーコンによる実交通量の計測と信号制御

前節で示した各現示の交通容量は正規化交通量に基づいた青時間と交差点飽和度からなる。正規化交通量は実交通量から計算される構造になっている。したがって、ビーコンにより交差点へ流入する交通量を正確に把握できれば、そのフローに対し効果的な信号制御を行うことができる。本研究では信号サ

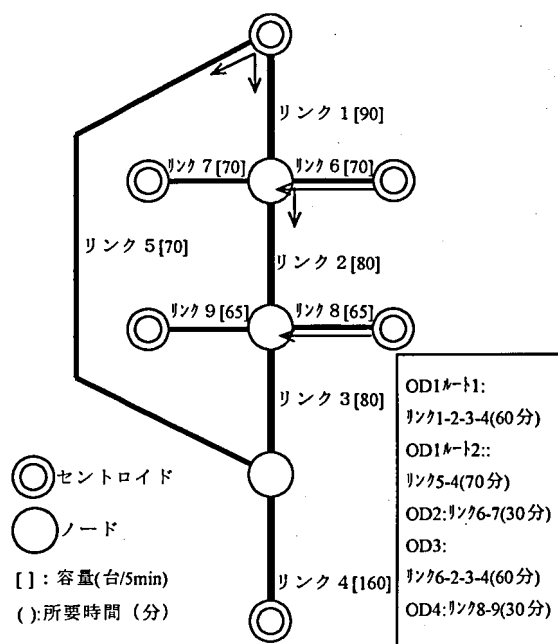


図4 モデルネットワーク

イクル・青時間と交差点容量を結びつけ、信号設定の時間変化を考慮したマクロなネットワークフローを評価する。

6. 数値実験

(1) モデルネットワークの設定

モデルネットワークを図2に示す。図のノードを信号交差点とする⁵⁾。OD1経路1は幹線ルートとし、自由走行時間が比較的短く、リンク容量を大きく設定しているが、主要交差点が3つあり、混雑を起しやすくしている。一方、OD1経路2は経路1の迂回路であり、自由走行時間が長く、リンク容量は小さい。幹線と迂回路はリンク4のところで合流している。シミュレーション時間帯にかかる全需要量はOD1が1350台、OD2が250台、OD3が500台、OD4が250台とする。また対向車需要量は50(台/5min)と設定した。

(2) ドライバーの交通行動特性の設定

通勤交通を想定し、通勤効用関数⁶⁾のパラメータは所要時間に関し0.05、始業時刻に対する早着時間に関し0.05、遅着時間に関し0.16と設定した。また情報利用者は全需要の70%とし、ドライバーの情報提供に対する依存度を0.75とした。そして1単位時間5分間隔でシミュレーションを行った。

(3) ケースの設定

ここでは、情報提供あるいは信号制御の有無が、経路や出発時刻選択に与える影響を分析する。情報が提供される場合、情報利用者は式(6)、(7)に従って知覚所要時間を修正し、事前の選択経路を変更する。

信号制御が行われる場合は、交差点流入フローに応じた青時間が設定され⁷⁾、交差点容量が変化する。信号制御が行われない場合、交差点容量は60(台/5min)に固定する。表1に設定したケースを示す。

表1 ケースの設定 (行う:○, 行わない:×)

ケース	1	2	3	4
情報提供	×	○	×	○
信号制御	×	×	○	○

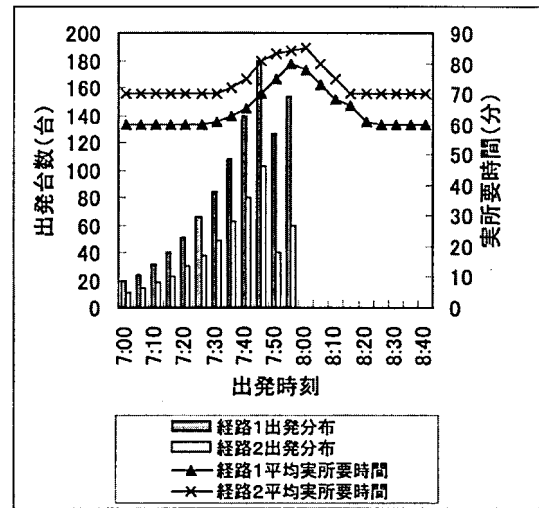
(4) 実験結果と考察

ここでは、道路容量の大きい幹線道路と迂回路からなるOD1の経路選択行動と渋滞緩和効果について検討する。表2に各経路の平均所要時間とネットワーク総所要時間を示す。またケース3と4の出発時刻と実所要時間分布を図3に示す。なお結果は、日々の選択行動において出発時刻分布が前回に対して変化がなくなった収束状態を示したものである。

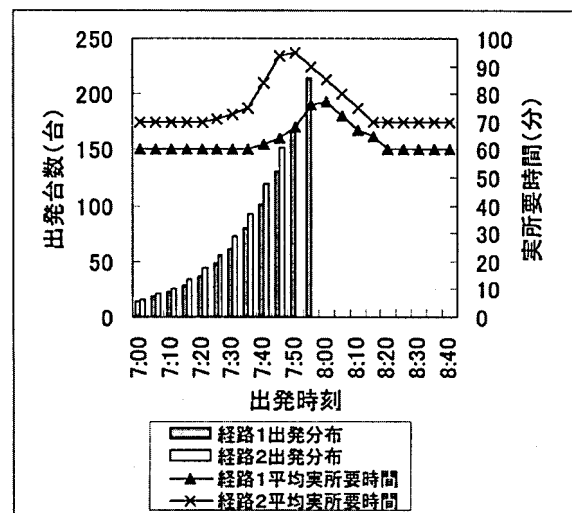
表2 各経路平均所要時間と総所要時間(分)

ケース	ルート1	ルート2	総所要時間
1	72.4	72.8	112465
2	82.7	70.1	123666
3	66.1	80.0	111224
4	67.9	75.3	108999

表1からケース1のように交差点容量が日々の変化も時刻変化も起こさず一定で、情報提供もされないと、ドライバーは各自の走行経験から最も通勤不効用が小さくなるような交通選択行動が行われる。その結果各ルートの平均所要時間が等しく、ほぼ均衡に近い状態が生じていることがわかる。ところが他のケースのように情報提供や信号制御を行うと均衡状態が崩れ、各経路の所要時間差が大きくなる。ケース2のように情報依存度の高いドライバーに情報提供のみ行った場合は、所要時間の短い経路にトリップが集中し、より大きな渋滞を生起させる可能性があることを示唆している。ケース3は情報が提供されないが、信号制御は行われている。したがって自由走行時間が短く、トリップが集中しやすい経路1の交差点容量が大きく設定されやすいため、経路間の所要時間差が大きくなるのが図3の所要時間分布からも分かる。ケース4では、所要時間情報がドライバーに提供されるため、所要時間の大きい経路2が回避されていることが図3の出発時刻分布からも分かる。したがって経路2の所要時間が大きく改善され、総所要時間が最も小さくなった。



(a)ケース3



(b)ケース4

図5 出発時刻分布と所要時間分布

7. まとめ

本研究の成果は次の通りである。

- (1) 情報提供だけでは、一部の経路に交通量が集中してしまい、大きな渋滞が生じる可能性がある。
- (2) 信号制御のみを行った場合も、交差点流入交通量の多い方向に青時間が長く与えられるため経路間の所要時間に大きな差が生じるおそれがある。
- (3) 信号制御と情報提供を組み合わせることで、更なる渋滞緩和効果が期待できる。

本論文では、簡単な例題を通して、提案したシステムの基本的なパフォーマンスを検討してみた。今後の課題として、さらに実際のネットワークに適用し、動的フローシミュレーションシステムの精緻化を図るとともに、高度交通管理システムへの展開を試みたい。

参考文献

- 1) 井上, 高山: 信号交差点を組み込んだ時間交通量配分モデルの動的化に関する研究, 第30回日本都市計画学会学術論文集, pp.637-642, 1995
- 2) 飯田, 藤井, 内田: 動的交通流シミュレーションを用いた道路網における情報提供効果に関する分析, 交通工学 Vol.31 No.6, pp.19-28, 1996年
- 3) TA-YIN HU, H S.MAHMASSANI: Day-to-Day Evolution Network Flows under Real-Time Information and Reactive Signal Control, Transpn. Res.-C, Vol.5, pp.51-69, 1997
- 4) M Jha et al.: Perception updating and day-to-day travel choice dynamics in traffic networks with information provision, Transpn Res.-C, Vol.6, pp.189-212, 1998
- 5) 柳沢, 高山: 信号交差点を考慮した高度交通管理のためのネットワークフローの評価, 第19回交通工学研究発表会論文報告集, pp.29-32, 1999年12月
- 6) 飯田, 柳沢, 内田: 通勤交通の経路選択と出発時刻分布の同時推定法, 土木計画学研究・論文集 No.9 pp.93-100, 1991年11月
- 7) 例えば藤田大二編交通工学実務双書: 交通現象と交通容量, 第4章 道路の各区間における交通容量
- 8) 飯田, 内田, 藤井, 鷹尾: 渋滞の延伸を考慮した動的交通流シミュレーション, 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.301-308, 1991