

投稿論文(和文ノート)

TECHNICAL
NOTE

交通渋滞にตอบสนองする自動車通勤者の出発時刻決定行動モデルに基づく疑似動的配分計算法

角 知憲*・清田 勝**・田村伸司***・
武田史郎****

本ノートは、さきに提案した自動車通勤者の出発時刻決定モデルに基づいて、疑似動的な経路配分を試みたものである。この疑似動的配分は、提案したモデルが交通渋滞に起因するリンクコストと実質消費時間の和からなる非効用を最小化するモデルであることを利用し、時間軸方向へのバイパスネットワークを与えて静的な配分計算をおこなうもので、ありふれた計算手法によって朝の通勤交通の時・空間的分布を大略把握できる。

Key Words : departure time choice, morning commute, traffic assignment, traffic congestion.

1. はじめに

自動車通勤者が経路上の交通渋滞にตอบสนองして出発時刻を決定する行動を記述するモデルは、すでに提案した¹⁾。このモデルは、通勤者が交通渋滞に起因する非効用(以下渋滞の非効用と呼ぶ。)と出発時刻から指定された到着時刻(以下ATAと略記する。)までの時間(実質消費時間, 以下VTCと略記する²⁾)の非効用の和を最小化すると仮定している。このモデルは、ATAに遅刻しない出発時刻より著しく早く出発する行動を取り扱うもので、ここでいう渋滞の非効用には所要時間の延長効果を陽に含んでいない。一方、交通量配分に関するワードロップの等時間原理は、人が所要時間で代表される非効用を最小にするように経路を選択すると仮定している。本ノートは、ワードロップの原理に出発時刻決定行動モデルを組み込むことによって、通勤交通の疑似動的な経路配分が可能であることを示そうとするものである。

2. 出発時刻決定モデルとネットワーク構成

(1) スーパーネットワークの構成

図-1は、横軸を時刻 t 、縦軸上方向を非効用 U 、下方向をある経路の代表的速度(たとえば平均旅行速度)にとって、交通渋滞にตอบสนองする通勤者の出発時刻決定行動を表わしたものである¹⁾。図中の U_{cd} は、交通渋滞に起因する非効用で、単位走行時間当り非効用を、

$$U_c = \alpha(V/V_0)^{-\beta} \dots \dots \dots (1)$$

とし、この U_c を t 軸上に選んだ出発時刻 t_0 から到着時刻の期待値 t_d まで積分した非効用、

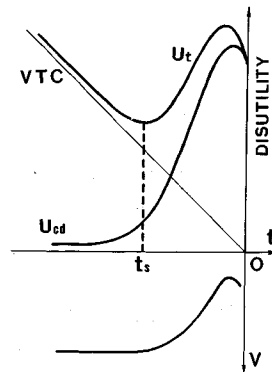


図-1 渋滞の非効用と実質消費時間¹⁾

$$U_{cd} = \int_{t_0}^{t_d} \alpha(V/V_0)^{-\beta} dt \dots \dots \dots (2)$$

で与えられる。ここに、 α 、 β は観測から推定される正の定数、 V は時刻と場所によって決まる経路上の平均旅行速度、 V_0 は基準となる旅行速度である。 U_{cd} は利用者均衡の結果として与えられる V と同時に決定されるが、他に旅行速度を決定する要因(経路を共有するより大きな交通需要など)が存在して図-1の下半分に示したように任意の変化をすることがある。経路を適当な区間に分け、時刻を適当な時間帯に分け、その区間と時間帯の組合せごとに一定の V を与えれば、式(2)は、

$$U_{cd} \cong \sum_j \sum_k \alpha(V(i, k)/V_0(i, k))^{-\beta} \cdot t_{ik} \dots \dots \dots (3)$$

と書き換えられる。ここに記号 i, k は、それぞれ第 i 時間帯、経路上の第 k 区間を表わし、 t_{ik} はその区間・時間帯に属する走行時間の期待値である。上式の U_{cd} は、 V が交通量の関数であることを考えれば、いわゆるリンクコストにほかならない。一方、非効用 U の尺度をVTCそのものにとると、出発時刻 t 自体が与える非効用は図のような直線になる。通勤者は、 U_{cd} とVTCの和、 U_c が最小の時刻 t_0 を出発時刻に選ぶ。すなわち、

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部土木工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 正会員 工博 佐賀大学助教授 理工学部建設工学科

*** 正会員 工修 熊本県

**** 学生会員 九州大学大学院土木工学専攻修士課程

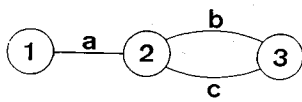


図-2 基本的なネットワーク

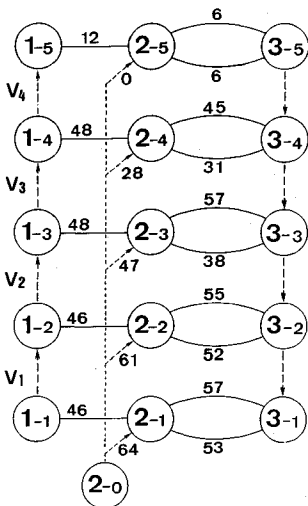


図-3 出発時刻に応じて階層的スーパーネットワーク

$$U_i = U_{cd} + VTC \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{dU_i}{dt} \Big|_{t=t_s} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

である。ここに、 $VTC = -t$ 、また $t < 0$ であることに注意する。ATAを指定されると、人は基本的には与えられたATAに対して出発時刻を決定する²⁾。その出発時刻を t_{s0} とする。ここでも $t_{s0} < 0$ である。自動車通勤者の出発時刻 t_{sa} は、両者のうち早い方、すなわち、

$$t_{sa} = \min. (t_s, t_{s0}) \dots \dots \dots (6)$$

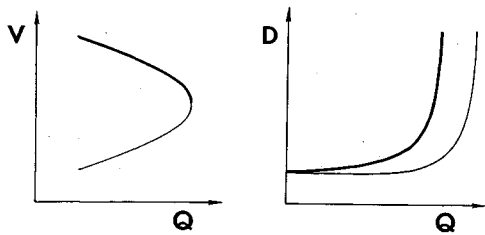
で与えられるというのが、提案された出発時刻決定モデルである。経路上の旅行速度と通勤者の出発時刻の観測に基づいてパラメータ α, β を推定する方法は文献1)に示されている。そこで、時間軸上で実務上十分な程度の粗さで離散的に与えた出発時刻の選択肢 $t_{sa(n)}, (t_{sa(n)} \leq 0, n=0, 1, 2, \dots)$ を考えれば、式(6)の表わす行動は次のように書き換えることができる。

$$\text{Minimize } U_i = U_{cd(n)} - t_{sa(n)} \dots \dots \dots (4')$$

$$\text{subject to } t_{sa(n)} \leq t_{s0} \dots \dots \dots (6')$$

ここに、 $t_{sa(0)}$ は出発時刻 t_{s0} を意味する。 t_{s0} はもともと確率変数であると定義されているが、十分粗い時間刻みを想定する場合は、平均的遅刻確率 1.3% と与えればよからう²⁾。リンクコストが $v_n = t_{(n)} - t_{(n+1)}$ であるような仮想のリンクを導入すれば、式(4')は、次のように一つの経路配分問題に書き換えられる。

$$\text{Minimize } U_i = U_{cd(n)} + \sum v_n \dots \dots \dots (4'')$$



(a) Q-V曲線 (b) リンクコスト関数

図-4 Q-V曲線とリンクコスト関数

いま、図-2のネットワークを考えよう。記号 a, b, c はリンクの識別記号である。この中のノード 1, 2 に発生交通量 O_1, O_2 を、ノード 3 に集中交通量 $D = O_1 + O_2$ を与える。これは、いわゆる Many-to-One 問題である。ここで、出発時刻を早めるという行動を、 $\sum v_n$ というコストを支払って図-3の破線で示した仮想のリンクを経由して非効用を最小化するように、あるスーパーネットワーク上にルートを選ぶとみなせば、通常の配分計算で式(4'')を実行することができる。なお、図中の矢印は一方通行リンクを示す。ノード 3 の下向き仮想リンクは、到着地での待機時間を意味する。待機時間にいくらかのコストを考えることもできるが、当面は零であるとしておく。

(2) リンクコスト関数

図-4(a)は、模式的に描いた Q-V 曲線である。Q は通常 1 時間交通量で与えられるが、今の場合、スーパーネットワークの間隔に見合った単位で与える必要がある。また、今のところ通勤交通のみを考えているので、他の目的の交通が混合する場合は、通勤以外の交通量を予め差し引いた交通容量を与え、それに応じて Q-V 曲線を修正する必要がある。さて、Q-V 曲線の上半分(太線部分)を、次のような関数で近似しよう。

$$V_k = V_{0k} (1 - Q_k / Q_{0k})^\alpha \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 V_k は走行速度、 V_{0k} は自由走行速度、 Q_k はリンク交通量、 Q_{0k} は交通容量、 α は経験的に決定される定数、添字 k は第 k リンクを意味する。式(7)を用いて式(3)右辺に代入すべきリンクコストが、

$$U_{cd(k)} = \alpha l_k (V_0^\beta / V_{0k}^{\beta+1}) (1 - Q_k / Q_{0k})^{-\alpha(\beta+1)} \dots \dots \dots (8)$$

と得られる。ここに、 l_k はリンク k の長さ、 $t_{ik} = l_k / V_k$ である。図-4(b)は、式(8)の与えるリンクコスト関数を表わす。 V_{0k} は式(1)の V_0 と必ずしも同じではないが、同図の太線は簡単のため $V_0 = V_{0k}$ と置いた場合を示す。もし $V_0 < V_{0k}$ と置けば、リンクコストは V_0 以上の領域で定数となるので、同図細線のように与えられよう。以下では、簡単のために太線を仮定するが、議論に本質的な差は生じない。

表-1 リンクの交通条件

リンク番号	交通容量 (台/10分)	リンク長 (km)	自由走行速度 (km/h)
a	100	5	40
b	80	8	35
c	60	6	30

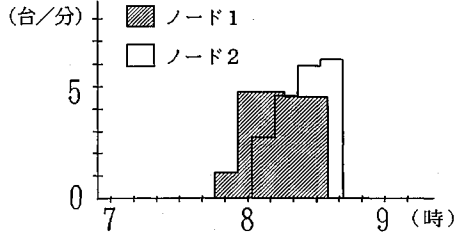


図-5 ノード1, 2からの出発時刻の分布

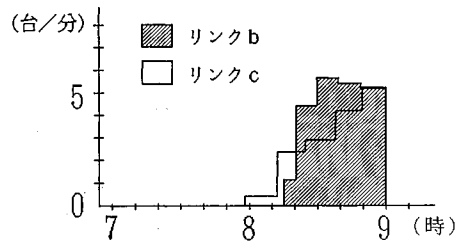


図-6 リンク a, b を通る交通の到着時刻の分布

3. 数値計算例

文献1)に従って、 α, β をそれぞれ0.415, 4.0と与えた上、 $x=0.3, O_1=O_2=300$ (台)、また、各リンクの交通容量、リンク長さ、自由走行速度を表-1のとおりとして、数値計算を試みてみる。計算手順は次のとおりである。

- ① 階層ネットワーク間の時間間隔を適当に与えて、配分計算を行う。この時間間隔が計算精度の指標である。
- ② 配分計算の結果与えられるリンク走行時間と t_{so} から、各ルートの交通量のノード到着時刻を計算する。
- ③ ODペア間、各ルート交通量間でノード到着時刻の不整合が小さいことを確認する。
- ④ 到着指定時刻に応答する各ノードからの出発時刻 t_{so} を計算し、ODペアごとにその最も遅く到着するルート交通量の出発時刻とする。これに合わせて他のルートの出発時刻を決定する。

本ノートで提案する方法は厳密な動的配分計算ではない。通常の等時間配分では、あるリンクを流れるすべてのODペア間交通量が相互に競合することになるが、本計算の結果与えられる旅行速度に従って出発時刻からリンク走行時間をたどってノード到着時刻を求めていくと経路によってずれが生じ、そのノードでの階層間間隔が他のノードと差を生じることがある。提案する計算は、①で選んだ精度の範囲内での近似計算であるから、精度内での誤差は問題とするに当たらない。しかし、有料の高速道路など、同一の出発時刻に対して階層間の時間間隔に比べて有意な到着時刻の差を与えるルートが存在する、あるいはあるリンクの所要時間に比べてリンク入口のノード到着時刻のずれの方が大きいといった結果を得ることがあり得る。その場合、階層間を繋ぐリンクを導入したり、計算精度に見合ったネットワークに再構成したりして、このような論理的矛盾を解消する必要がある。上記③は、このような観点からの検討を意味している。

配分計算の結果を、図-3のリンクに付した数値で示す。ここに、階層ネットワーク間の間隔は10分である。さらに、かりにATA=9時として、この配分交通量を時間軸上に落とし、階層間隔10分で除して、ノード1, 2からの出発時刻の密度分布、ノード3への到着時刻の密度分布に換算したものを図-5, 6に示す。この時、簡単のため t_{so} はjust-in-timeで到着する(最も遅く到着する時刻がATAに一致する。)ものとして、最も遅い到着時間帯の最後をATAに一致させている。この結果には、前述のような論理的矛盾はない。

4. 考察と結論

本ノートでは、機関分担や分布交通量を配分と併せて計算する場合に用いられるスーパーネットワーク²⁾を、出発時刻とルートを同時に決定する計算に応用した。これは、前に提案した出発時刻決定行動モデルが交通渋滞の非効用を実質消費時間、すなわち出発時刻を早めることの非効用と比較して定量化する構造を持っていることを利用したものである。提案した方法は、ネットワークを数倍に拡張するため計算量が大きくなるが、計算自体は容易である。ただし、時間軸へ落としたノード通過時刻には前述のようなずれがあり得るので、実務的には、ある程度の試行錯誤と、ある程度の誤差を許容する態度が必要である。

提案した方法を実務的に応用するためには、さまざまな工夫が必要となると考えられる。その工夫の一つとして、本ノートで採用した時間軸方向の一方通行仮想リンクと合わせて、さまざまな仮想ノードを導入することが考えられる。たとえば、図-7は、Many-to-Manyの配分問題など、やや大規模なネットワークを扱おうとする場合、出発時刻の決定に際してのみ時間軸方向の仮想リンクを避れること、仮想リンクを下ってこれるのは目的地においてだけであることを実現するために、交通路上のノードとは別に、出発地・目的地を割り振る仮想のノードと一方通行リンクを用いたものである。図の添字O-1をもつノードに第iノードの発生交通量を、添字D-1を持つノードに第jノードの集中交通量を与える。この仮想ノードを用いることによって、途中から上の階層(早い時間帯)へ移るというルート、および途中

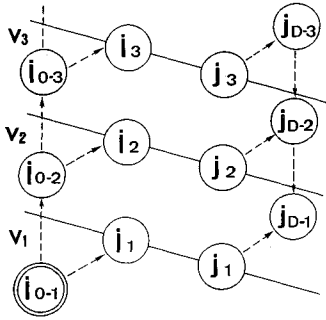


図-7 途中ノードでの階層間移動の阻止法

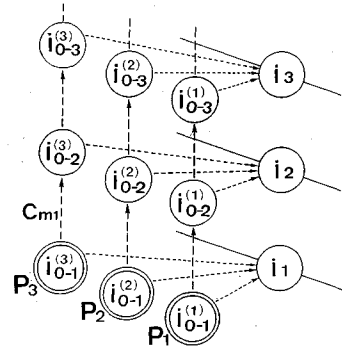


図-8 異質性の考慮の方法

で下の階層へ移る(途中で時間つぶしをする)というルートを除くことができる。また、図-8は、人の異質性を考慮するための工夫の例である。本ノートでは、簡単のため異質性を考慮しなかったが、文献1)は人によって渋滞の非効用に対する評価が異なることを想定し式(1)のパラメータ α の分布で個人差を表している。そこで、 α の代表座標値 α_m を持つ人の割合 P_m とする。スーパーネットワークの間隔を $v_n(n=1, 2, \dots)$ とすると、 $\alpha = \alpha_m$ の人の総非効用 $U_i(\alpha_m)$ は、

$$U_i(\alpha_m) = \sum v_n + \sum (\alpha_m l_k / V_0) (1 - Q/Q_{ck})^{-x(\beta+1)} \quad (9)$$

と与えられる。右辺第二項は、すべての人が混合して交通するリンクの上で α_m に応じて異なったコストを与えるので、このままでは通常の配分計算ができない。そこで、両辺を α_m で除して、

$$U_i(\alpha_m) = U_i(\alpha_m) / \alpha_m = \sum v_n / \alpha_m + \sum (l_k / V_0) (1 - Q/Q_{ck})^{-x(\beta+1)} \dots \dots \quad (9')$$

とし、 $c_{mn} = \sum v_n / \alpha_m$ を、パラメータ α_m を持つ P_m の割合の人だけが通行できるような仮想のリンクのコストとして定義する。すなわち、図-8に示すように、異なる α_m ごとに別々の仮想発生ノード(上添字 (m) で表わす。 $P_m O_i$ の発生交通量を与えられる。)を与え、仮想リンクのコストを c_{mn} と与えるのである。

参考文献

- 1) 角 知憲・岡田良司・杉野浩茂・宮木康幸：経路上の交通渋滞にตอบสนองする自動車通勤者の出発時刻決定行動モデル，土木学会論文集，No. 446/IV-16, 1992.
- 2) 松本嘉司・角 知憲・田辺俊郎：一般化出発時刻に基づく交通の実質消費時間の推定，土木学会論文報告集，No. 337, pp. 177~183, 1983.
- 3) Sheffi, Y. : Urban Transportation Networks, pp.203~230, Prentice-Hall, 1985.

(1992. 10. 26 受付)

A QUASI-DYNAMIC TRAFFIC ASSIGNMENT BASED ON A COMMUTERS' DEPARTURE TIME CHOICE MODEL RESPONDING TO TRAFFIC CONGESTION

Tomonori SUMI, Masaru KIYOTA, Shinji TAMURA, and Shiro TAKEDA

This technical note proposes a method for quasi-dynamic traffic assignment on the basis of the commuters' departure time choice model responding to en-route traffic congestion, which has been previously proposed. The proposed method uses supernetworks spaced corresponding to the departure time selection. The proposed method is based on the structure of the departure time choice model and it provides a basis for calculating quasi-dynamic traffic assignments under various situations.