

通勤交通の経路選択と出発時刻分布 の同時推定法*

柳澤 吉保**・飯田 恭敬***・内田 敬****

Estimation of Route Choice and Departure Time in a Stochastic Equilibrium Model

By Yoshiyasu YANAGISAWA, Yasunori IIDA, Takashi UCHIDA

This paper presents the basic model that estimations route choice and departure time distributions at the commuter rush hour. The choice of route and departure time is based on the trade-off between travel time and schedule delay. The utility function consists of the estimated travel time, schedule delay, lateness in arrival at work. This model applies to the urban road networks with multiple trip origins and destinations by means of the new dynamic traffic assignment.

1. はじめに

朝の通勤交通について考えると、各通勤者の勤務する会社には仕事開始時刻が決められているため、通勤者はこれに間に合うように居住地を出発する。そのため各会社の仕事開始時刻が同一の場合、企業立地の集中している都心付近の道路では通勤による交通量が集中し、渋滞を引き起こすことになる。これを解決する方法として、会社の始業時刻を変更して、通勤者の出発時刻分布をずらしたり、公共交通機関との適正な分担を行うことによって道路上の交通量ピークを低くすることが考えられる。したがって、このような政策問題を立案するためのモデル作成においては、経路に対する需要交通量を従来の研究のように時間的に一定とした静的配分問題として取り扱うことは問題がある。すなわち、仕事開始時刻や到着指定時刻が決められている場合の通勤者の通勤挙動を動的に分析し、どのような発生交通の時刻分布が形成され、経路上の交通量が時間を追ってどのように変化するか明らかにする必要がある。

通勤交通の出発時刻分布の推定に関する従来の研究についてはいくつか行われているが¹⁾²⁾、全通勤時間帯での通勤挙動を明かにでき、しかも短い時間間隔で変動する発生交通量を容易に求めることのできる方法として、通勤効用を勤務先までの所要時間、到着してから仕事開始までの到着余裕時間、また遅刻した場合のペナルティーにより表し、効用最大化

* 平成3年9月土木学会全国大会第46回年次学術講演会にて一部発表

** 土木工学科 助手

*** 京都大学工学部 教授

**** 京都大学工学部 助手

理論にもとづいた経路選択と出発時刻分布を求めるモデルが開発されている³⁾。しかし、このモデルは通勤行動の収束状態を求めるために通勤者の効用とは別に修正係数を用いており、収束までの交通状態の変化の仮定に現実的な学習効果が反映されていない。

それゆえモデルは、毎日の交通状態の学習を反映した通勤効用により、選択行動の収束状態を説明できることが望ましい。また、従来の研究では、いずれも単一 OD に対する解析しか行われておらず、実際の道路網のような多数 OD が存在している場合の計算方法については示されていないので、実際の交通運用面への適用を考えると、多経路多 OD に適用できるモデルに拡張する必要がある。

本研究では通勤者集団の出発時刻選択行動を容易に扱うことのできるネスティッドロジットモデル³⁾を用いた通勤者集団の経路選択・出発時刻分布の同時推定モデルを提示するが、上で述べた点を考慮し、新たに、

- (1) 均衡状態までの繰り返し行動については、通勤者が毎日の交通状態の変動を考慮して、過去の走行経験をもとに所要時間を見積るものとし、過去に経験した見積誤差を蓄積し、それを補正量として通勤者が通勤前に見積る所要時間について定式化を行う。
- (2) 動的交通量配分の新しいモデル⁴⁾を組み込んで多経路多 OD の道路網へ適用するための計算方法を示す。
- (3) 数値計算では、効用関数のパラメータをいくつか与え、その通勤挙動特性について考察を行う。

2. ボックスモデルによる動的交通量配分⁴⁾

ボックスモデルによる動的交通量配分の基本的な考え方と、その計算方法を次に示すが、本研究では経路、出発時刻の選択については、通勤直前に決定されるとし、ロジットモデルにより選択率の推定を行う。そしてトリップ途中では経路の変更は行われないと仮定しているため、ここではボックスモデルは単に所要時間の動的再現モデルとして用いている。

(1) リンク内フローの基本的な考え方

リンク所要時間はリンク自由走行時間+遅れ待ち時間で表されるので、図-1のようにリンクを自由走行の箱 (K個) と自由走行時間からの遅れ待ち行列箱 (L個) により構成する。したがってリンク内の箱の総計 (K+L) が、このリンクの存在可能台数を与える。箱1つが1単位時間であり、前リンクからのフローはこのリンクを流出するまでに少なくとも自由走行時間は要するので、渋滞の場合は自由走行箱の最も後端である第K番目の箱以降の空いている部分にフローを埋めていく。そして箱の中のフローは1単位時刻ごとに進行方向側の箱に1つだけ移動する。それゆえ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めることができる。1つの箱の大きさは、そのリン

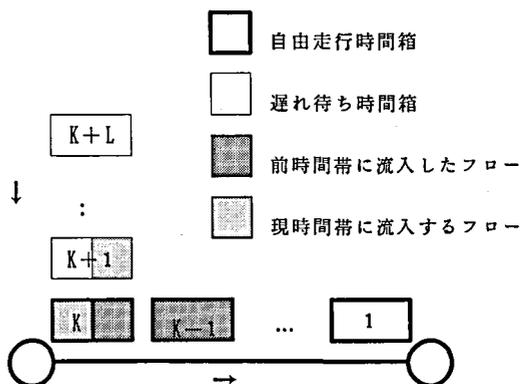


図-1 リンク内の走行状態の箱

クの単位時間当りの流出容量であり、箱の中は異なったOD、経路、出発時刻のフローが存在するが、それらは一様に混ざっていると仮定する。

(2) 計算アルゴリズム

あるOD、経路、出発時刻に出発した交通量の所要時間を求めるための計算アルゴリズムを次に示す。

step. 1 : 各時刻ごとのOD表、経路行列、各リンクの箱数、流出容量の読み込み。

step. 2 : 時刻を $t = 1$ として計算開始。

step. 3 : 各リンクの先頭の箱のOD、経路、出発時刻ごとの交通量を step. 4の計算で消去しないように step. 5まで保存するため、各リンクの一時記憶箱に記憶する。ただし、このリンクの先端がODの集中点の場合は所要時間を計算する。

step. 4 : 各リンクの先端から2番目以降の箱の内容を進行方向へ1つ移動させる。

step. 5 : 一時記憶箱のフロー情報を各OD、経路、出発時刻別に次のリンクの待ち行列の最後端から埋めていく。

step. 6 : 全時間帯について計算が終われば計算をストップ。そうでなければ $t = t + 1$ として step. 3へ戻る。

ただし、同一のOD、経路、時刻に出発したフローでも目的地に到着するまでに他のフローと混合し、出発時の車群が拡散してしまうため、所要時間が異なってくる。そこでその平均所要時間については

$$\bar{t}_i(r, t_s) = \frac{\sum_{t_a} x_i(r, t_s, t_a)(t_a - t_s)}{x_i(r, t_s)} \tag{1}$$

ここで、

- $\bar{t}_i(r, t_s)$: ODi, 経路 r , 出発時刻 t_s のフローの実所要時間の平均値
- $x_i(r, t_s, t_a)$: ODi, 経路 r , 出発時刻 t_s , 到着時刻 t_a の交通量
- $x_i(r, t_s)$: ODi, 経路 r , 出発時刻 t_s の交通量

である。

3. 通勤者の効用関数

(1) 一般道路利用者の効用関数¹⁾

ここでは到着指定時刻があり、時刻 t_s に出発し、経路 r を利用する通勤者の効用について考える。朝の通勤交通を考えた場合、勤務地等に到着指定時刻が決められていると、それらを考慮に入れた出発時刻や経路選択を行わなければならない。到着指定時刻が決められている場合の出発時刻・経路選択行動についてまず考えられる主な要因は、出発してから仕事開始までに消費する時間（実所要時間+到着余裕時間）である。通勤者は通常この時間をできる限り小さくしようとする。ただしあまり短くしようとして、遅めに出発すると遅刻してしまう。また遅刻を避けるために早めの出発時刻を選ぶと、早く目的地に到着してしまい、仕事が始まるまでの待ち時間が長くなり、無駄な時間消費をしてしまう。そのほかに、走行時の交通混雑により受けるストレスも考慮にいれて選択行動を行っていることが考えられる。これらのことを考慮にいれて次のような一般道路の効用関数の構築を行なう。

一般道路利用者が通勤行動を起こす前に見積る出発から仕事開始までに消費するコストについては、毎日の通勤により出発から勤務先までに見積る所要時間、到着してから仕事開始時刻 t_d までの到着余裕時間、また遅刻してしまった場合の罰金も考慮にいれて、それらのトレードオフにより決まるので、次のような効用関数が考えられる¹⁾。

$$V_i(r, t_s, n) = -a\hat{t}_i(r, t_s, n) - C_p(r, t_s) \quad (2)$$

$V_i(r, t_s, n)$: 時刻 t_s に出発し、一般道路の経路 r を利用するODiの通勤者の第 n 日目の効用関数値

$\hat{t}_i(r, t_s, n)$: 居住地から勤務先までにかかる通勤者の第 n 日目の見積所要時間

$C_p(r, t_s)$: 到着余裕時間、または遅刻時間に関する不効用で以下のように定義する。

$$C_p(r, t_s) = \begin{cases} b(t_d - t_a(t_s)) : t_d \geq t_a(t_s) \\ c(t_a(t_s) - t_d) : t_d < t_a(t_s) \end{cases}$$

a, b, c : 不効用に関するパラメータ

$t_a(t_s)$: 時刻 t_s に出発した場合の勤務先に到着する時刻

なお、 $t_d \geq t_a(t_s)$ は遅刻しない場合であり、 $t_d < t_a(t_s)$ は遅刻した場合を表している。

(2) 通勤者の見積る所要時間について

ある日の通勤で得られた効用によって次の日の出発時刻、経路選択を決定すると考えた場合、効用が大きい選択肢に需要が集中して所要時間が大きくなると、その選択肢は次の日には効用が低下するであろう。すなわち、このような前日みの経験による効用関数を用いた選択行動は効用に対する感度が高く収束しにくいことが明らかになっている³⁾。しかし実際の通勤行動では繰り返し行動によって得られた経験の蓄積や所要時間の不確実性も考慮に入れて選択行動を行うため、収束した状態になっているものと思われる。そのことを考慮して、本研究では過去の走行経験をもとに所要時間を見積る方法について提案し、その定式化を行う。所要時間の予測機構については次のようなモデルが提案されている^{5), 6)}。

$$\hat{t}(r, t_s, n+1) = \bar{t}(r, t_s, n) + \alpha_0 + \alpha_1 y(r, t_s, n) + \alpha_2 y(r, t_s, n-1) + \alpha_3 y(r, t_s, n-2) \quad (3)$$

ここで、

$$y(r, t_s, n) = \hat{t}(r, t_s, n) - \bar{t}(r, t_s, n)$$

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: パラメータ

$\bar{t}(r, t_s, n)$: 実所要時間の平均値

(3)式では過去に経験した見積誤差を蓄積し、前日の所要時間に見積誤差による補正量を加えることによって次回の所要時間の見積を行っている。このモデルでは通勤行動の時系列データや経路選択実験によりパラメータの同定を行うことができる。

4. 通勤効用関数による通勤行動の動的均衡モデル

(1) 出発時刻・経路選択の同時推定法³⁾

通勤者は毎日起こす通勤行動において様々な出発時刻、経路を選択するが、出発時刻 $t_s = \{t_0, \dots, T\}$ 、経路 $r = \{1, \dots, R\}$ を選択する確率 $P(r, t_s)$ について考えると、通勤者は効用が最大となる選択肢を選ぶが、個々の行動は必ずしも常に合理的選択行動に厳密に従うとは限らず、

また効用関数の評価に対しても同じ価値判断を持っているとはかぎらない。そこで、効用最大化理論によるロジットモデルを適用して、選択確率 $P(r, t_s)$ を求めることにする。ここで経路、出発時刻に関するスケールパラメータをそれぞれ μ_1, μ_2 とおき、その大小関係について(4)式が成り立つと仮定すると、

$$0 < \mu_2 \leq \mu_1 \tag{4}$$

選択順序については図-2のように経路の最大効用も考慮した上で出発時刻の選択を行うことになる。

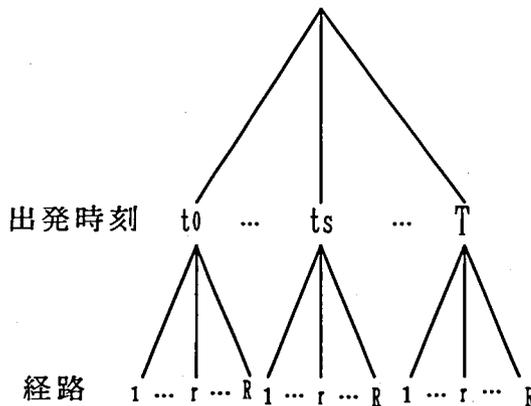


図-2 出発時刻・経路選択ツリー

選択確率 $P(r, t_s)$ についてまずは、式(5)のように t_s が所与の時、選択肢 r を選ぶ条件付き確率 $P(r | t_s)$ と t_s を選択する確率 $P(t_s)$ との積による同時確率と考えられるため、ネステッドロジットモデルが適用できる³⁾。

$$P_i(r, t_s) = P_i(r | t_s) \cdot P_i(t_s) \tag{5}$$

その通勤行動により得られる効用関数については以下のように表わす。

$$U_i(r, t_s, n) = V_i(r, t_s, n) + \epsilon(r | t_s) + \epsilon(t_s) \tag{6}$$

$U_i(r, t_s, n)$: ランダム効用関数

$V_i(r, t_s, n)$: 経路 r , 出発時刻 t_s の組合せによって変化する効用関数値

$\epsilon(r | t_s)$: t_s のもとでの経路 r に関する効用関数の不確定項

$\epsilon(t_s)$: 出発時刻 t_s に関する効用関数の不確定項

n : 第 n 日

(6)式の効用関数値は(2)式により与えられる。そこで第 n 日目の同時選択確率 $P(r, t_s, n)$ は次のように表すことができる。

$$P_i(r, t_s, n) = P_i(r | t_s, n) \cdot P_i(t_s, n) = \frac{\exp[\mu_{1i} V_i(r, t_s, n)]}{\exp[\mu_{1i} V_i(*, t_s, n)]} \times \frac{\exp[\mu_{2i} V_i(*, t_s, n)]}{\exp[\mu_{2i} V_i(*, *, n)]} \tag{7}$$

ここで

$$V_i(*, t_s, n) = \frac{1}{\mu_{1i}} \ln \sum_j \exp[\mu_{1i} V_i(j, t_s, n)] \tag{8}$$

$$V_i(*, *, n) = \frac{1}{\mu_{2i}} \ln \sum_u \exp[\mu_{2i} V_i(*, u, n)] \tag{9}$$

効用関数値である(2)式のパラメータ a, b, c は最尤推定法により求めることができる。

こうして $P(r, t_s, n)$ が決められると、第 n 日目に時刻 t_s , 経路 r を選択する通勤者の発生量

(台) $X_i(r, t_s, n)$ は、対象とする通勤時間帯の総発生量を X とすると次式で求められる。

$$X_i(r, t_s, n) = X \cdot P_i(r, t_s, n) \quad (10)$$

(2) 計算アルゴリズム

2, 3, 4章の考え方にもとづいて、各経路の出発時刻分布を求めるためのアルゴリズムを示す。

step. 1: $n=1$ として計算を開始。

step. 2: 各出発時刻、経路に適当な発生量の初期値 $X_i(r, t_s, n-1)$ を与える。

step. 3: 2章のボックス型交通量配分モデル⁴⁾により各出発時刻、経路の所要時間を求める。

step. 4: 各出発時刻、経路の予測所要時間を(3)式により求める。

step. 5: (2)式により効用関数値 $V_i(r, t_s, n)$ を求める。

step. 6: 各出発時刻、経路選択確率 $P_i(r, t_s, n)$ をstep. 5で求めた効用関数値を用いて(7)式により求める。

step. 7: 各出発時刻、経路ごとの発生量 $X_i(r, t_s, n)$ を(10)式を用いて求める。

step. 8: $|X_i(r, t_s, n) - X_i(r, t_s, n-1)| < \delta$ であれば計算を終了。そうでなければ $n=n+1$ としてstep. 3へ戻る。

5. 仮想モデルによる数値計算例と考察

仮想モデルを設定し数値計算を行なう。モデルケースとして、ここでは効用関数のパラメータを幾通りか与え、通勤者の挙動がどのように変化するか考察を行なう。

(1) 数値計算例

図-3のような3ODの道路網について計算を行なう。OD1はノード1~2間、OD2はノード1~3間、OD3はノード2~3の間としOD1, 2ともリンク1を通る場合が経路1, リンク2を通る場合が経路2とする。

通勤時間帯は7:00から8:40までとし、時間間隔は5分を単位とする。企業の仕事開始時刻はすべて8:55とし、その総発生量はOD1が1670台、OD2が1090台、OD3が430台とする。

動的交通量配分の諸条件については、リンク1, 2, 3の流出容量が84, 94, 100台であり、リンクの自由走行時間はそれぞれ20分, 30分, 25分とする。

(3)式については $\alpha_0=0.40$, $\alpha_1=0.70$, $\alpha_2=0.15$, $\alpha_3=0.05$ とした。

(4)式のスケールパラメータ μ_1 , μ_2 については、簡単のため1とした。

以上のデータは操作性を考慮し仮想的に与えたものである。

数値計算については以下のケースで計算を行なう。

ケース1: 効用関数のパラメータを $a=0.08$, $b=0.08$, $c=0.5$ とした場合でこれを基本ケースとする。ここでは所要時間と到着余裕時間のウェイト a , b を等しくし、遅刻ペナルティをこれらのウェイトの6.25倍とした。

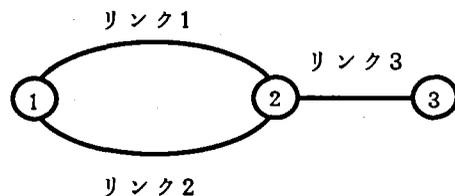


図-3 対象道路網

ケース 2：効用関数のパラメータを $a=0.08$, $b=0.04$, $c=0.5$ とした場合、これはケース 1 と比較し、到着余裕時間のウェイト b を小さくした場合であり、多少早めに到着しても仕事開始までの時間損失による不効用が小さいことを意味している。

ケース 3：効用関数のパラメータを $a=0.08$, $b=0.08$, $c=0.25$ とした場合で、ケース 1 と比較し、遅刻に対するペナルティのウェイトを小さくした場合である。

以上の 3 ケースで経路選択、出発時刻分布を求める。

(2) 結果の考察

OD1 経路 2 における各ケースの出発需要分布を図-4 に示す。また各ケースの総走行時間を表-1 に示す。

ケース 1 では到着余裕時間のウェイトが比較的大きいため、到着余裕時間で不効用をなるべく小さくするように仕事開始時刻ぎりぎり到着できる出発時刻を選択する。そのため特定の出発時刻に需要が集中する傾向があり、総走行時間も最も大きくなっている。

ケース 2 ではケース 1 と比較し到着余裕時間のウェイトが小さいため、そのための効用の減少は多少到着余裕時間が長くても、所要時間効用の減少と比較して小さい。そこでケース 1 と比較すると、早い時間帯から、比較的大きい交通量が発生し、通勤時間帯でなだらかな出発時刻分布を形成することから、混雑も小さく、全般的に所要時間が短くなる。そのため総走行時間も最も小さい。

ケース 3 ではケース 1 と比較し、遅刻ペナルティが小さい。このケースでも所要時間と到着余裕時間のウェイトが等しいため、ケース 1 で述べた理由と同じくケース 2 と比較すると、ある出発時刻に発生量が集中するが、遅刻での不効用が小さいため、多少の遅刻も覚悟で、他のケースよりも遅い時刻での発生量が多くなっている。そのため総走行時間もケース 1 よりも小さい値を示している。

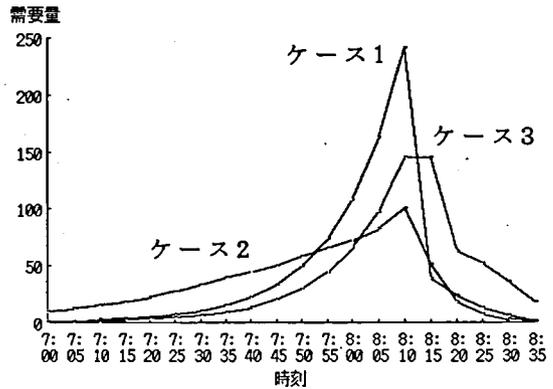


図-4 OD 1 経路 2 の発生交通の時刻分布

表-1 各ケースの総走行時間 (分)

	ケース 1	ケース 2	ケース 3
総走行時間	141884	130019	134987

以上、本研究で開発したモデルを用い、多経路多 OD の道路網において、通勤挙動を解析することができることを示した。

6. おわりに

本研究では、通勤交通の経路選択と出発時刻分布の推定を行うための、基本モデルの開発を行った。このモデルでは、毎日の所要時間の変動の学習を通し、各自の経路と出発時刻が決められていることを考慮して、過去の所要時間の見積誤差も含めた通勤前の所要時間の見積について示し、通勤効用関数の決定法について示した。また出発時刻・経路選択同時推定

についてはネスティッドロジットモデルを用いて行い、さらに新しい動的交通量配分の方法を用いて多経路多ODの実際の道路網への適用を可能とした。本研究で示した計算方法によって安定状態に達する通勤交通の出発時刻分布と経路選択挙動を推定することが出来るため、需要ピークのコントロールを主体とした混雑緩和策の立案に役立てることができると考えられる。そしていくつかの数値計算例により、以下のような結論と課題が得られた。

- (1) 効用関数のパラメータを変えて計算を行った結果、所要時間、到着余裕時間、遅刻ペナルティーのウェイトの大きさによりなかり異なった出発時刻分布が形成されるが、到着余裕時間のウェイトが大きい場合には始業時刻ぎりぎりに到着しようとして発生交通が集中するため混雑が起りやすいと考えられる。また所要時間に対し到着余裕時間のウェイトが小さい場合には、早い時間帯から比較的大きな交通量が発生し、なだらかな出発時刻分布を形成することから、混雑も小さいと考えられる。
- (2) 数値計算は操作性を考慮したモデルケースで行ったが、データの収集とパラメータの同定法も含め、実際の道路網へ適用し、通勤挙動特性を明らかにしなければならない。
また、本研究の位置づけとしては時差出勤・適正機関分担による混雑緩和策での通勤挙動解析を目的としているが、この点で今後の課題として
- (1) 鉄道、バス等の公共交通機関の動的交通流モデルの開発を行なう。
- (2) 混雑緩和策の具体策をモデルの中へ反映させる。

参 考 文 献

- 1) C. HENDRICKSON, G. KOCUR: Schedule Delay and Departure Time Decision in a Deterministic Model, *Transportation Science* Vol. 15, No. 1, February, 1981
- 2) Hall, R. W.: Travel outcome and performance: The effect of uncertainty on accessibility, *Trans. Res.-B* Vol. 17B, No. 4, pp. 275-290. 1983.
- 3) BEN-AKIVA: Dynamic Model of Peak Period Traffic With Elastic Arrival Rates, *Trans. Sci.* Vol. 20, No. 2, pp. 164-181, 1986.
- 4) 鷹尾和亨, 飯田恭敬, 内田 敬: 経路選択シミュレーションによる動的交通量配分, 土木学会第45回年次学術講演会Ⅳ, 1990年10月
- 5) 飯田恭敬, 内田 敬, 宇野伸宏: 通勤者の旅行時間予測機構に関する実験分析, 第13回土木計画学研究講演集, pp.335-342, 1990年11月
- 6) 飯田恭敬, 内田 敬, 泉谷 透: 旅行時間変動による損失を考慮した適正経路分担交通量, 土木計画学研究・論文集 No. 8 pp.177-184, 1990年11月
- 7) 松本昌二, 白水義晴: 旅行時間の不確実性が時刻の指定された物資輸送に及ぼす影響, 土木学会論文集 第353号/Ⅳ-2 pp.75-82 1985年1月
- 8) 柳沢吉保, 飯田恭敬, 内田 敬: 通勤交通の経路選択と出発時刻分布の同時推定法, 土木学会第46回年次学術講演会Ⅳ, 1991年9月