

# 経路上の交通渋滞に応答する自動車通勤者の出発時刻決定行動モデル

角 知憲\*・岡田良司\*\*・杉野浩茂\*\*\*・  
宮木康幸\*\*\*\*

本論文は、交通渋滞に応答する自動車通勤者の出発時刻決定行動を記述するモデルを提案するものである。モデルは、通勤者が、渋滞に伴う走行速度の低下の関数である非効用と、実質消費時間（出発時刻から到着すべく指定された時刻までの時間）の和を最小化するように、出発時刻が選ぶと仮定している。モデルは、ある工場の勤務者の出勤行動をよく再現した。このモデルは、すでに提案され、公共交通機関を利用する通勤者に適用されている一般化出発時刻モデルを補完し、自動車通勤者の行動を公共交通機関利用者の行動と整合的に記述するためのステップとなるものである。

**Keywords :** departure time, commutation, private cars, traffic congestion

## 1. はじめに

本論文は、経路上の交通渋滞に対する応答関数として、自動車通勤者の出発時刻の決定行動を記述するモデルを提案するものである。通勤交通は、目的地とそこに到着する時刻を厳しく指定された交通であり、人は、その指定に応じることを主な動機として行動する。しかし、著しく混雑する道路を通行せざるをえない場合は、交通渋滞のもたらす諸々の不愉快や不利益を減少させることの方が支配的な動機となることがある。本論文では、このような行動を取り扱う。従来、自動車運転者の交通渋滞に対する行動は、交通配分問題を中心取り上げられ、利用者均衡問題などの数学的側面の研究や、実務的な要求に応えるためのプログラミティックな視点からの研究が進められるとともに<sup>1),2)</sup>、ピーク交通量と経路配分とが関連して取り上げられるなかで<sup>3)~8)</sup>、自動車通勤の経験論的な理解への要求は高まってきた。これらの研究には、数学的な記述方法に主な関心を置くものや<sup>4)</sup>、パラメトリックな数値実験を試みて立脚する経験的基礎が必ずしも強固でないもの<sup>5)</sup>、あるいは経験的データに基づいていても比較的マクロな視点に立って、一都市あるいは一地域全体を一括して取り扱おうとするもの<sup>6),8)</sup>が多い。ところで、通勤行動は複雑な多数の要因の影響の下で行われ、それを実際的に予測しようとすれば、最終的には、それら要因を包括的に考慮したモデルが必要になる。しかし、経験論的研究という立場からいえば、一挙に包括的なモデルを作成するより、できるだけ少數の要因を考慮したモデルを、できるだけ統制された条件の下で適用することから出発し、それを逐次改訂していくと

いうアプローチの方が有利である。なぜなら、ある統制された条件下で観測された行動と、別の条件下で観測された行動の相違を、条件の相違によって表現することが比較的容易になるからである。このような観点に立てば、個々人の行動のミクロな観測に基づいてモデルを構成することが望ましい。ミクロな視点のモデルほど、個々の通勤者の置かれた条件の相違をより明白に反映することができる。著者らは、このような視点にたつモデルとして、通勤者は到着すべく指定された時刻に遅刻する確率を十分小さくするよう行動するとするモデルを既に提案し、公共交通機関の利用者に適用しているが<sup>9)~11)</sup>、自動車通勤者は、交通渋滞の影響を強く受ける点で、公共交通機関利用者とは大きく相違した条件に置かれる。したがって、提案したモデルはこれを考慮するように改訂する必要がある。本論文では、このような観点から、交通渋滞のみを考慮するモデルを作成し、モデルで用いた仮定ができるだけ純粋に成立する環境における通勤者の行動に適用しようとするものである。本論文で提案するモデルは、公共交通機関利用の場合のモデルと並列の形で自動車通勤の場合に適用されることになる。

## 2. 交通渋滞に対する応答のモデル化

### (1) 行動モデル

自動車通勤者が、交通渋滞にともなう不愉快・運転の労力・走行上の危険性の増大など、もちろんの不利益を避けようとして出発時刻を決定する行動は、これら不利益と交通のために費やす時間のもつ不利益の和を最小にする最適化行動であるとみなすことができる。

ある経路を自動車を用いて出勤する通勤者を考えよう。この経路上では、早朝からラッシュアワーと言われる時間帯にかけて、交通渋滞が発生するものとする。渋滞の程度の指標として旅行速度の低下をとる。図-1の第三象限は、横軸を時間にとって旅行速度の変化を模式

\* 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 工修 三菱信託銀行  
\*\*\* 正会員 工修 運輸省  
\*\*\*\* 正会員 工博 足利工業大学助教授 工学部土木工学科

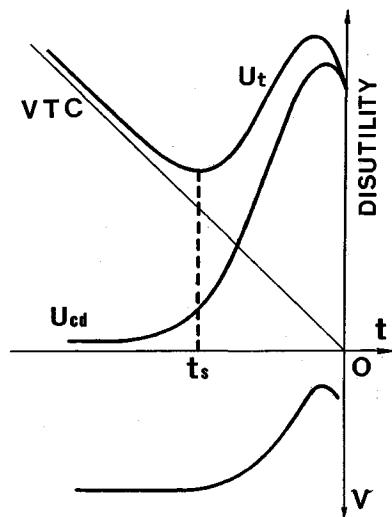


図-1 渋滞の非効用と実質消費時間

的に示したものである。通勤者は、日々の反復経験からその変化を熟知しており、日々変動する旅行速度の平均値と、それが与える不利益（以下、非効用と呼ぶ）の期待値に対して応答するものと仮定する。

ある平均旅行速度  $v$  で単位時間走行する時の非効用  $U_c$  を  $v$  の関数として次のように表わす。

$$U_c = f(v) \quad (1)$$

$v$  は時刻  $t$  と経路上の場所  $x$  によって決まる変数である。

$$v = v(x, t)$$

通勤者の出発地の位置、出発時刻をそれぞれ  $x_o, t_0$  で表わすと、通勤者が  $t_0$  以後の任意の時刻  $t$  に占める経路上の位置のアンサンブルな平均値  $x$  は、 $x_o, t_0$  と  $t$  の関数として与えられる。

$$x = x(t, x_o, t_0)$$

したがって、その地点での平均速度  $v$ 、そこを単位時間走行する非効用  $U_c$  は、同様に  $t, x_o, t_0$  の関数となる。

$$U_c(t, x_o, t_0) = f(v(x(t, x_o, t_0), t, x_o, t_0)) \quad (2)$$

目的地に至るまでの渋滞による非効用の期待値  $U_{cd}$  は、上式を  $t_0$  から目的地  $x_d$  に到着する時刻の平均値  $t_d$  まで積分して求められる。

$$U_{cd}(x_o, t_0) = \int_{t_0}^{t_d} U_c(t, x_o, t_0) dt \quad (3)$$

この非効用は、図-1 に示すように、早朝からラッシュアワーといわれる時間帯にかけて走行速度  $v$  が減少するとともに増大し、交通量がピークを超えて走行速度が回復するにつれ減少に転じるであろう。

次に、交通のために費やす時間の非効用を考える。この非効用は、出発時刻から指定された到着時刻までの時間（実質消費時間<sup>9), 10)</sup> と一対一に対応するものと考えよう。すると、非効用の単位として実質消費時間をとる

のが考えやすい。図-1 に示すように、横軸に時間軸をとり時間軸の原点を到着指定時刻にとれば、実質消費時間  $VTC$  は、 $VTC = -t_0$  である（出発は到着指定時刻より前であるから、 $t_0 < 0$  である）。非効用  $U_{cd}$  も  $VTC$  に換算して  $VTC$  と加算可能なものと仮定することにすれば、出発地  $x_o$  からの出勤交通の非効用の総和の期待値  $U_t$  は、次のように与えられる。

$$U_t(x_o) = U_{cd}(x_o, t_0) - t_0 \quad (4)$$

そこで、前述の最適化行動によって出発時刻が選ばれるすれば、出発時刻  $t_s$  は、次式で与えられる。

$$\frac{dU_t}{dt_0} \Big|_{t_0=t_s} = \frac{dU_{cd}}{dt_0} - 1 = 0 \quad (5)$$

ここで問題は、式 (1) に用いる関数である。この関数には、通勤者が不快を感じないで走行できる旅行速度の下限  $v_0$  を仮定して、 $v \geq v_0$  で  $U_c = \text{const.}$ 、 $v \rightarrow 0$  で  $U_c \rightarrow \infty$  となる関数として次式を用いてみる。

$$U_c = \alpha(v/v_0)^{-\beta}, (\alpha > 0, \beta > 0) \quad (6)$$

$v_0$  は道路規格によっても異なるであろうことを考慮して式 (6) では速度を正規化して用いている。パラメータ  $\alpha, \beta$  および  $v_0$  は観測によって決定する。式 (6) を用いてみると、式 (5) で与えられる出発時刻  $t_s$  は、出発地  $x_o$  目的地  $x_d$  を条件として、 $\alpha, \beta$  の関数となる。この関数を次のように表わす。

$$t_s = F(\alpha, \beta | x_o, x_d) \quad (7)$$

ところで、人の行動は個人差と場合差を含んで変動する。この変動を表現するため、 $\alpha$  を確率変数として定義し、その PDF を  $\phi_\alpha(\alpha)$  とする。式 (7) の逆関数を用いると、 $t_s$  の PDF、 $\phi_{ts}(t_s | \beta, x_o, x_d)$  が次のように与えられる。

$$\phi_{ts}(t_s | \beta, x_o, x_d) = \phi_\alpha(F^{-1}(t_s | \beta, x_o, x_d)) |d\alpha/dt_s| \quad (8)$$

式 (8) は、人の判断のばらつきを表すパラメータ  $\alpha$  の変動と選択された出発時刻  $t_s$  の関係を示しているので、この式から逆に、出発時刻の変動から  $\alpha$  の変動を推定することができる。本論文の目的は、パラメータ  $\alpha$  の分布と  $\beta$  を数値的に推定することである。

## (2) パラメータ $\alpha, \beta$ の推定方法

$\phi_\alpha(\alpha)$  および  $\beta$  は、次のように推定できる。まず、出発地  $x_o$ 、目的地  $x_d$  の位置を与えて、道路上の任意の断面  $x$  で観測される通過時刻の PDF を  $\phi_{trx}(t | x_o, x_d)$ 、出発時刻  $t_s$  を与えた時の  $x_o$  から  $x$  までの所要時間の PDF を  $\phi_{trx}(t | x_o, t_s)$  とする。通過時刻は出発時刻に所要時間を加えたものであるから、両者には次の関係がある。

$$\phi_{trx}(t | x_o, x_d) = \int_{-\infty}^0 \phi_{trx}(t - t_s | x_o, t_s) \phi_{ts}(t_s | \beta, x_o, x_d) dt_s$$

$$= \int_{-\infty}^0 \phi_{trx}(t - t_s | x_o, t_s) \cdot \phi_\alpha(F^{-1}(t | \beta, x_o, x_d)) |d\alpha/dt_s| dt_s$$

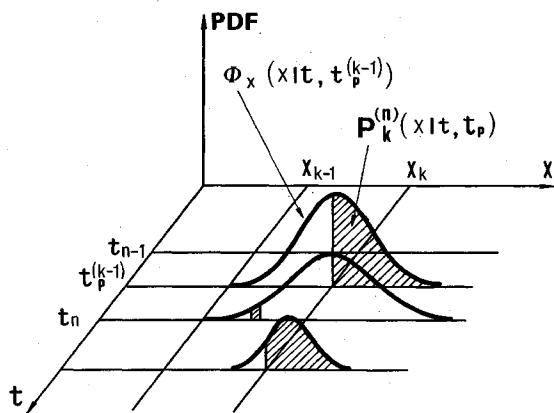


図-2 経路上断面の通過時刻の計算

$$= \int_0^\infty \phi_{trx}(t-t_s|x_o, t_s) \phi_\alpha(\alpha) d\alpha \quad (9)$$

$x_o$  の分布を考えて、その PDF を  $g_{x_o}(x_o)$  であらわすと、

$$\begin{aligned} \phi_{trx}(t|x_d) &= \int_0^\infty \int_x^\infty \phi_{trx}(t-t_s|x_o, t_s) \\ &\quad \cdot \phi_\alpha(\alpha) g_{x_o}(x_o) d\alpha dx_o \end{aligned} \quad (10)$$

となる。さらに、いくつかの目的地  $x_{dm}$  ( $m=1, 2, \dots$ ) を考える時は、次式を用いる。

$$\begin{aligned} \phi_{trx}(t) &= \sum_m A_m \int_0^\infty \int_x^\infty \phi_{trx}(t-t_s|x_o, t_s) \phi_\alpha(\alpha) \\ &\quad \cdot g_{x_o}(x_o) d\alpha dx_o \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 $A_m$  は第  $m$  番目的地に出勤する者の割合である。 $\alpha$  と  $x_o$  の変動は独立であると仮定すれば、式 (11) は次のように書き換えられる。

$$\phi_{trx}(t) = \int_0^\infty K(t, \alpha) \phi_\alpha(\alpha) d\alpha \quad (12)$$

$$K(t, \alpha) = \sum_m A_m \int_x^\infty \phi_{trx}(t-t_s|x_o, t_s) g_{x_o}(x_o) dx_o \quad (13)$$

$\phi_{trx}(t)$ ,  $\phi_{trx}(t|x_o, t_s)$  やび  $g_{x_o}(x_o)$  を観測に基づいて与え、式 (12) 式に用いれば、 $\phi_\alpha(\alpha)$  を求めることができる。ただし、 $\phi_{trx}(t-t_s|x_o, t_s)$  自身が  $x_o$  と  $t_s$  に依存するので、通常の場合と異なって式 (13) の計算は、以下に述べるような煩雑な繰り返し計算を要する。

### (3) 経路上任意断面の通過確率の計算

この計算を簡便に行うため、次のような方法をとる。旅行速度の PDF,  $q_v(v|x, t)$  が  $x$  と  $t$  に応じて連続的に変化すると考えるかわりに、ある距離区間  $(x_{k-1}, x_k]$  内で、ある時間区分  $(t_{n-1}, t_n]$  にわたって近似的に一定であるが、区間から区間に、また区間から区分へと変化するものと考える。つまり、図-2 の  $x-t$  平面上に区切られる一区画ごとに一つの  $q_v(v|k, n)$  を与えるのである。そこで、断面  $x_{k-1}$  を時刻  $t_{p^{(k-1)}}$  に通過した車が、断面  $x_k$  をすでに通過している確率を時刻  $t$  の関数として求めよう。

いま、 $t_{n-1} < t_{p^{(k-1)}} \leq t_n$  となる  $n$  が与えられたとする。

#### a) $t_{p^{(k-1)}} < t \leq t_n$ の期間

旅行速度の PDF,  $q_v(v|k, n)$  に  $x=v\tau$  なる変数変換を行って作られる次の関数、

$$\begin{aligned} \phi_x(x|\tau) &= q_v(x/\tau|k, n) |dv/dx| \\ &= q_v(x/\tau|k, n) (1/\tau) \end{aligned}$$

は時間  $\tau$  の間の移動距離の PDF を表わす。そこで、時刻  $t_{p^{(k-1)}}$  から経過時間  $t$ 、断面  $x_{k-1}$  からの移動距離  $x$  を考えれば、自動車の位置の PDF,  $\phi_x(x|t, t_{p^{(k-1)}})$  は、

$$\phi_x(x|t, t_{p^{(k-1)}}) = q_v\left(\frac{x-x_{k-1}}{t-t_{p^{(k-1)}}}|k, n\right) \frac{1}{t-t_{p^{(k-1)}}} \quad (14)$$

である。図-2 には、式 (14) で得られる  $\phi_x(x|t, t_{p^{(k-1)}})$  を示してある。ここで、この PDF のうち  $x > x_k$  の部分は、自動車がすでに  $x_k$  を通過した確率  $P_k^{(n)}(t)$  を表わしている。つまり、

$$P_k^{(n)}(t) = \int_{x_k}^\infty \phi_x(x|t, t_{p^{(k-1)}}) dx = \int_{v_k}^\infty q_v(v|k, n) dv \quad (15)$$

である。ここに  $v_k = (x_k - x_{k-1}) / (t - t_{p^{(k-1)}})$  である。

#### b) $t_n < t \leq t_{n+1}$ の期間

式 (14) に  $t=t_n$  を代入すれば、その時の自動車の位置  $x_n$  の PDF が、

$$\phi_{xn}(x_n|t_n, t_{p^{(k-1)}}) = q_v\left(\frac{x_n-x_{k-1}}{t_n-t_{p^{(k-1)}}}|k, n\right) \frac{1}{t_n-t_{p^{(k-1)}}} \quad (14')$$

と得られる。ただし、 $x_n$  の範囲は  $(x_{k-1}, x_k]$  である。微小区間の長さを  $dx$  とすれば、その自動車が任意の地点  $(x_n, x_n+dx)$  にいる確率は、 $\phi_{xn}(x_n|t_n, t_{p^{(k-1)}}) dx$  である。その後、自動車は次の時間区分の速度分布、 $q_v(v|k, n+1)$  で走りはじめると考える。この自動車が  $t_n < t \leq t_{n+1}$  に占める位置は式 (14) 中の  $x_{k-1}$  を  $x_n$  に、 $t_{p^{(k-1)}}$  を  $t_n$  に置き換えれば、次のように得られる。

$$\phi_x(x|t, x_n, t_n) = q_v\left(\frac{x-x_n}{t-t_n}|k, n+1\right) \frac{1}{t-t_n} \quad (14'')$$

そこで、時刻  $t$  にすでに断面  $x_k$  を通り過ぎている確率  $\Delta P_k^{(n+1)}(t|x_n)$  は、次のように与えられる。

$$\Delta P_k^{(n+1)}(t|x_n) = \int_{x_k}^\infty \phi_x(x|t, x_n, t_n) dx \quad (16)$$

$x_n$  の分布を考えて、時刻  $t_n$  に断面  $x_k$  を通り過ぎていなかった自動車が、時刻  $t(t_n < t \leq t_{n+1})$  に通り過ぎている確率  $\Delta P_k^{(n+1)}(t)$  は、次式で与えられる。

$$\Delta P_k^{(n+1)}(t) = \int_{x_{k-1}}^{x_k} \Delta P_k^{(n+1)}(t|x_n) \phi_{xn}(x_n|t_n, t_{p^{(k-1)}}) dx_n \quad (17)$$

結局、時刻  $t$  に断面  $x_k$  を通り過ぎている確率、 $P_k^{(n+1)}(t)$  は、次式で与えられる。

$$P_k^{(n+1)}(t) = P_k^{(n)}(t_n) + [1 - P_k^{(n)}(t_n)] \Delta P_k^{(n+1)}(t) \quad (17)$$

#### c) $t_{n+1} < t \leq t_{n+2}$ の期間

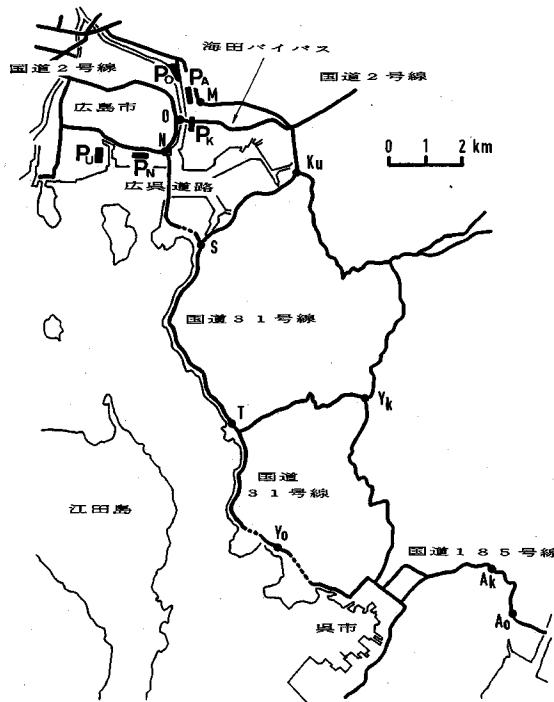


図-3 観測対象地域と道路網の概略

上記 b )において、 $t_n$ を $t_{n+1}$ に、 $t_{n+1}$ を $t_{n+2}$ に置き換えて同様の計算を行う。

#### d) それ以後の時間

$n$ を一つずつ進めながら、同様の計算を繰り返す。

このようにして、任意の時刻  $t_p^{(k-1)}$  に断面  $x_{k-1}$  を通過した自動車が、時刻  $t$  にすでに断面  $x_k$  を通過している確率の累積分布関数を求めることができる。この関数の時間微分が断面  $x_k$  の通過時刻の PDF である。断面  $x_{k-1}$  の通過時刻が、PDF、 $\phi_{t_p}^{(k-1)}(t_p)$  で与えられる場合は、任意の通過時刻  $t_p$  を条件として上の計算を行った後、微小時間  $dt_p$  内の断面  $x_{k-1}$  の通過確率  $\phi_{t_p}^{(k-1)}(t_p)$   $dt_p$  をかけて積分すればよい。旅行速度  $v$  の PDF が  $x$  と  $t$  に応じて連続的に変わるものとすると、この計算は容易ではないが、上述の取り扱いは、 $v$  の PDF の変数変換の繰り返しにより、比較的容易に実行できる。

### 3. 非効用関数の推定

#### (1) 通勤行動の観測

本論文では、ある自動車工場への通勤者を観測することにした。この工場では十分な広さの駐車場をいくつか用意して、通勤者に利用すべき駐車場を指定しているので、駐車場占有行動が現われる余地は少ない。また、社内記録から個々の通勤者の出発地と自動車のプレートナンバーを厳密に知ることができる。さらに、駐車を許可された車には外部から観察可能なステッカーを貼付させ

表-1 地点間距離 (単位: km)

地点 1	地点 2	距離
A o	A k	1. 4 6
A k	4.	6 2
Y o	S	3. 8 7
S	M	9. 4 7
K u	K	5. 5 0
Y u	T	3. 9 7
K a	Y n	4. 8 0
O	N	1. 2 0
M	P o	1. 5 0
M	P u	0. 8 0
K u	P k	4. 3 0
N	P n	0. 4 0
N	P u	1. 4 0

Ao:阿賀沖田, Ak:阿賀北, Ka:亀石, Ku:熊野別, M:向洋  
N:仁保, O:黄金橋, S:坂, T:天応, Yn:矢野, Yo:吉浦

ているので、個々の車の経路上の地点の通過時刻をミクロに観測できる。図-3は、この工場の持つ主な駐車場 ( $P_o, P_A, P_K, P_N, P_U$ ) と通行経路を示す。図中の国道31号線は、Sと記入された地点で二つに分岐し、一方は国道2号線と合流し、他方は有料の道路橋を通過するショートカットルートとなる。以後、前者を第一ルート、後者を第二ルートと呼ぶ（現在では、第二ルートが延伸されて、分岐などの事情が異なっている）。図中、アルファベットを付した地点は路側観測点である。この地点では、貼付されたステッカーから対象となる通勤者を識別し、あるいは通過するすべての自動車のプレートナンバーと通過時刻を照合して地点間の旅行速度を求めた。表-1にこれら観測点と駐車場の間の距離を示す。表-2は、観測された旅行速度の10分間ごとの平均値と標準偏差を示している。図-4に、平均旅行速度の変化を図示した。

この地域から自動車で通勤する者は734名であるが、この工場はライン従業者について三交替制をとっているので、その約1/3が朝の交通渋滞の時間帯に出勤する。図-5は、路側観測点Sを基準として横軸をルートに沿った観測点までの距離にとり、Sから  $Y_o$  までに存在する通勤者の出発地の分布を、目的地とする駐車場ごとに示したものである。図-6は、同様に観測点  $Y_o$  を基準として、 $Y_o$  以遠に出発地を持つ通勤者の出発地分布を示す。これらの情報を式(14), (14')あるいは(14'')に用いることにより、これら通勤者集団がそれぞれ任意の時刻に出発した場合の観測点S、あるいは  $Y_o$  の通過時刻を算出することが可能となる。旅行速度および自動車通勤者の通過時刻の観測から、第一ルートの通行者の路側観測点通過時刻は旅行速度が急速に低下する時間帯に密接に関連していること、計算の結果、この通過時刻は公共交通機関を用いる場合（一般化出発時刻による場合<sup>6,7)</sup>）に比べかなり早いことがわかった。工場の始業時刻は駐車場  $P_o, P_A, P_K$  を利用する者については8時15分、 $P_N, P_U$  を利用する者8時25分である。また、

表-2 旅行速度の時間的变化 ( $\mu_v$ : 平均値,  $\sigma_v$ : 標準偏差, 単位: m/s)

Block	$A_o \rightarrow A_k$		$A_k \rightarrow Y$		$Y \rightarrow S$		$S \rightarrow N$		$K_u \rightarrow M$		$K_u \rightarrow O$		
	Time	$\mu_v$	$\sigma_v$	Time	$\mu_v$	$\sigma_v$	Time	$\mu_v$	$\sigma_v$	Time	$\mu_v$	$\sigma_v$	
5:20 ~ 5:30													
5:30 ~ 5:40	13.661	1.531	13.823	1.837	16.959	1.813							
5:40 ~ 5:50	12.880	1.623	13.086	1.588	17.801	1.814							
5:50 ~ 6:00	12.050	2.363	12.527	1.622	17.521	1.624							
6:00 ~ 6:10	11.865	2.435	10.246	1.384	16.246	1.226							
6:10 ~ 6:20	12.687	2.394	8.144	1.806	14.972	1.208	15.839	1.921	8.892	0.539	14.618	1.753	
6:20 ~ 6:30	10.241	2.152	5.705	0.942	13.866	1.185	16.017	1.570	8.741	0.890	14.911	1.280	
6:30 ~ 6:40	12.172	2.285	4.849	2.713	12.318	0.548	16.492	2.330	8.301	0.817	14.272	1.423	
6:40 ~ 6:50	13.675	3.217	3.238	1.231	10.441	1.203	15.958	2.113	6.591	1.055	11.851	1.890	
6:50 ~ 7:00	11.517	2.298	2.884	0.399	7.916	0.969	16.072	1.586	5.217	1.047	8.740	1.519	
7:00 ~ 7:10	8.776	1.327	2.848	0.501	5.708	0.380	15.865	1.640	4.826	0.675	7.322	1.264	
7:10 ~ 7:20	6.233	1.363	2.882	0.707	5.270	0.257	15.465	1.451	4.740	0.664	6.283	0.916	
7:20 ~ 7:30	4.057	0.549	3.307	0.964	5.940	0.205	14.151	2.114	3.970	0.680	5.356	0.492	
7:30 ~ 7:40				4.104	0.268	6.270	0.193	7.314	1.510	3.371	0.429	5.615	1.610
7:40 ~ 7:50						7.084	0.419	12.496	4.176	4.014	0.712	6.187	0.731
7:50 ~ 8:00						8.012	0.505	16.118	1.819	3.547	0.856	7.965	0.779
8:00 ~ 8:10						10.176	0.984	17.548	3.886	4.132	0.807	9.848	0.699
8:10 ~ 8:20						12.132	1.451	15.876	2.324	3.340	0.754	11.499	2.015
8:20 ~ 8:30						13.125	0.935			3.543	0.653	13.814	1.774
8:30 ~ 8:40										3.829	0.291	13.552	1.375
8:40 ~ 8:50										4.951	0.187	13.996	1.440
8:50 ~ 9:00											14.424	1.247	

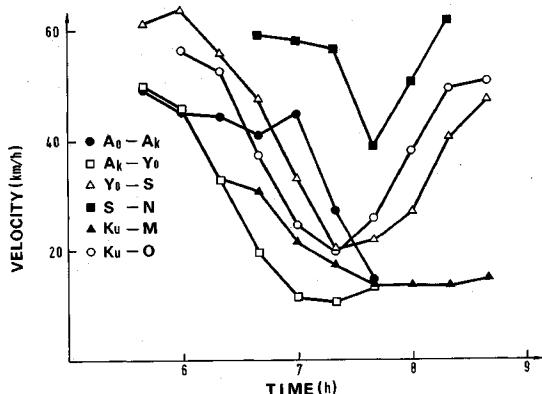


図-4 旅行速度の変化

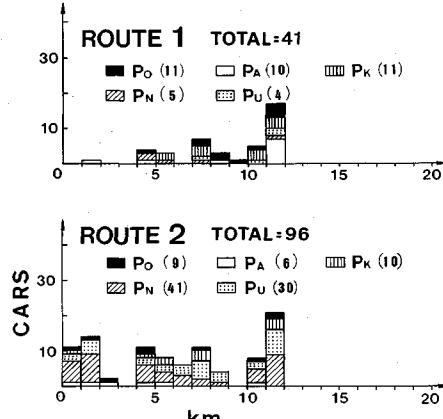
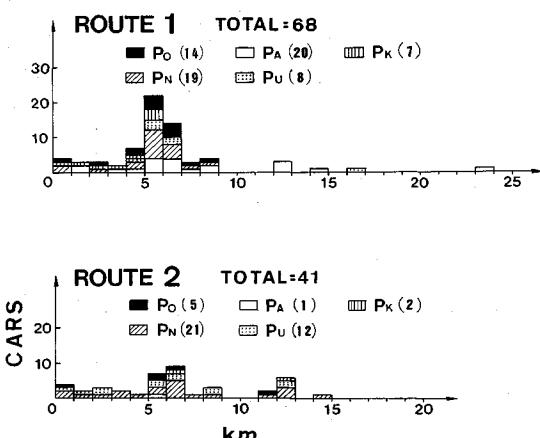
第二ルートは有料（通行料 150 円）であり、交通量は渋滞を生じるほど多くない。

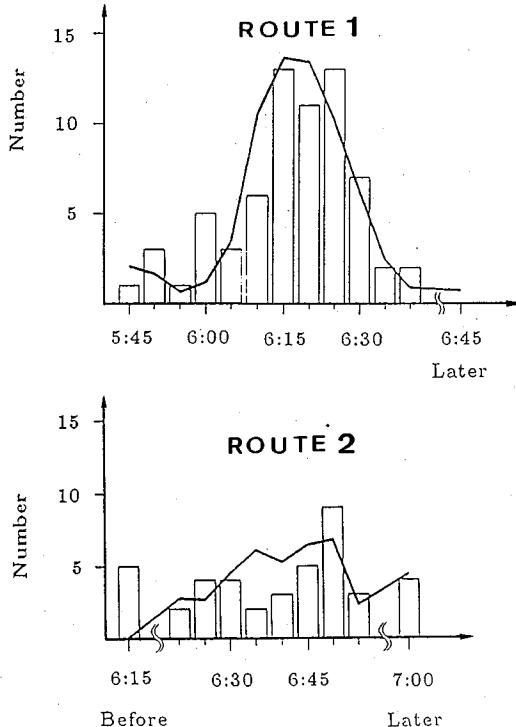
ところで、通勤者が自動車を用いる場合にも、指定時刻に遅れないことを動機として行動するなら、公共交通機関利用者と同じく一般化出発時刻モデル<sup>9), 11)</sup>が適用できるであろう。そこで、本論文で提出しようとするモデルと一般化出発時刻モデルを結びつけて、

① 自動車通勤者は、経路上の交通渋滞に応答して出発時刻を決定する。

② 同時に、その出発時刻が、一般化出発時刻で与えられる出発時刻より遅くなることはない。

という仮説が構成できる。この仮説は、自動車通勤者は、渋滞に応答する出発時刻と、一般化出発時刻で与えられる出発時刻の内、早い方の時刻を選ぶということを意味する。すると、通勤者集団の中に一般化出発時刻モデルに従う小集団が混じることがあるが、その小集団については渋滞に対する応答が検出されないことになる。観測

図-5 出発地の分布（点 S から  $Y_o$  まで）図-6 出発地の分布（点  $Y_o$  以遠）

図-7 観測点  $Y_0$  以遠通勤者の路側観測点通過時刻

点  $S$  から  $Y_0$  までの間に出発地を持つ通勤者の過半は第二ルートを選ぶが、これら通勤者について、駐車場に入つてから工場構内の勤務場所までの移動時間、更衣時間のおおまかな測定に基づいて一般化出発時刻モデルを適用したところ、観測された点  $S$  の通過時刻とほぼ一致する通過時刻が計算された。この通勤者集団は、渋滞に対する応答を測定する対象としては不向きである。一方、 $Y_0$  以遠に出発地を持つ通勤者が第二ルートを通る場合、観測された  $Y_0$  点通過時刻は、その分布の最も遅い一部分を除き一般化出発時刻モデルで計算されるそれよりも早く、走行速度が急激に低下する少し前の時間帯に通過している。そこで本論文では、観測点  $Y_0$  以遠を出発地とする集団のみを対象とする。図-7 の棒グラフは、この通勤者集団の断面  $Y_0$  通過時刻の観測結果をルートごとに表わしたものである。図中の折れ線については後述する。

## (2) ルート選択と出発時刻選択の関連

出発時刻の選択とルート選択とが独立に行われるか否かは、経験的に検討する他はない。公共交通機関を利用し一般化出発時刻モデルに従う通勤者では、二つの選択が独立に行なわれると仮定して実害がないことが示されているが<sup>10)</sup>、交通渋滞に応答する自動車通勤者では、経路選択によって出発時刻の決定様式に有意な差が見られた。そこで、二つの選択が独立でないものとして、 $\alpha$  を条件とするルート選択行動を考察する。ルート選択に係

わる非効用は、本論文で取り上げたものに限らない。特に、このケースでは第二ルートの通行料金が影響するであろう。いずれにせよ、各ルートに応じて非効用が定義できる。人の評価の変動を考慮して、その非効用は確率変数であるとする。いま、考えられる二つのルートに関して、 $\alpha$  を条件とするこの非効用の PDF が  $f_1(D|\alpha)$ 、 $f_2(D|\alpha)$  と与えられたとしよう。ある人がルート 1 を選ぶ確率  $P_1(\alpha)$  は、ルート 2 の非効用が、ルート 1 のそれより大きい確率で与えられるから、次式を得る。

$$P_1(\alpha) = \int_0^{\infty} f_1(D|\alpha) \int_D^{\infty} f_2(x|\alpha) dx dD \cdots \cdots \cdots (18)$$

集団全体で  $\alpha$  の分布を  $\phi_{\alpha}(\alpha)$  で与えるとすると、 $\alpha$  軸上の微小区間  $\Delta\alpha$  を用いてパラメータが  $\alpha$  である確率は  $\phi_{\alpha}(\alpha)\Delta\alpha$  で与えられるから、パラメータが  $\alpha$  で、かつルート 1 が選ばれる同時確率は、 $P_1(\alpha)\phi_{\alpha}(\alpha)\Delta\alpha$  である。すなわち、一方のルートを選んだ集団の中の  $\alpha$  の分布は、 $P_1(\alpha)$  によって歪んだものになっている。また、ルート 2 についても、 $P_2(\alpha) = 1 - P_1(\alpha)$  を用いて、パラメータが  $\alpha$  で、かつルート 2 が選ばれる同時確率は、 $P_2(\alpha)\phi_{\alpha}(\alpha)\Delta\alpha$  である。そこで、 $\alpha$  の元の分布はこの二つの同時確率を加えることによって求められる。

$$\{P_1(\alpha)\phi_{\alpha}(\alpha) + P_2(\alpha)\phi_{\alpha}(\alpha)\}\Delta\alpha = \phi_{\alpha}(\alpha)\Delta\alpha \cdots \cdots \cdots (19)$$

それぞれのルートを選んだ集団の人数を  $N_1$ 、 $N_2$  とすると、各々のルートに個別に式 (12) を適用して求められるみかけ上の  $\alpha$  の PDF は、 $P_i(\alpha)\phi_{\alpha}(\alpha)\Delta\alpha/(N_i/N_{12})$ 、( $i=1, 2$ ) にはかならない。ここに、 $N_{12} = N_1 + N_2$  である。したがって式 (19) は、個別に算出された  $\alpha$  の PDF に、 $N_i/N_{12}$  を乗じて加算すれば元の PDF が求められることを示している。

## (3) 数値計算

### a) パラメータ $\alpha$ の平均値、 $\beta$ 、 $v_0$ の推定

パラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $v_0$  の推定を、 $\alpha$  の平均値  $\alpha_a$ 、 $\beta$ 、 $v_0$  を求める第一段階と  $\alpha$  の分布を求める第二段階に分けて実行する。第一段階の計算は次のような方法をとった。

1) 平均的な出発地からの平均的な出発時刻を推定する。そのために、

① 対象とする集団の出発地の平均的な位置を求める。

② 次に、表-2 に示した平均速度を用い、その集団の断面  $Y_0$  の平均通過時刻から平均出発時刻を、目的地とする駐車場ごとに逆算する。旅行速度を計測していない一部区間では、最も隣接する区間の速度を用いる。

2)  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $v_0$  に適当な初期値  $\alpha_{01}$ 、 $\beta_1$ 、 $v_{01}$  を与えて  $U_{cd}$  を計算する。 $U_{cd}$  の値は出発時刻によって変化するので、出発時刻をスイープすることによって、式 (4) の  $U_t$  が最小となる時刻を探す。

3) この時刻と1)で求めた出発時刻の推定値との2乗誤差がの和が小さくなるように $\alpha_{a1}$ ,  $\beta_1$ ,  $v_{01}$ を逐次修正し, 2乗誤差の和が最小となるものを, パラメータ $\alpha$ の平均値 $\alpha_a$ ,  $\beta$ ,  $v_0$ の推定値とする.

旅行速度の単位を m/s にとって推定された  $\alpha_a$ ,  $\beta$ ,  $v_0$  は,  $\alpha_a=0.25$ ,  $\beta=4.0$ ,  $v_0=12.5$  m/s (45 km/h) であった. この値は  $\alpha_{a1}$ ,  $\beta_1$  の広い範囲をスイープして求めたものであるが, 実はほとんど同じ程度の 2 乗誤差を与える点がある線上に並ぶ. つまり,  $\alpha_a$ ,  $\beta$  は一定の関数関係を満たしさえすれば, ある程度自由に選べるものであった. これは, 式 (6) の形を考慮すれば十分理解できる結果である. 式 (6) は  $\alpha$  を分子に  $(v/v_0)^{\beta}$  を分母にする形を持つが, ある  $\alpha$  と  $\beta$  の組合せで与えられる  $U_c$  の値は, より大きい数値を持つ別の  $\alpha$  と  $\beta$  の組合せや, より小さい数値のさらに別の組合せでも実現できる. 実際,  $\alpha$  と  $\beta$  はセットで意味を持つのである.

b) 旅行時間と通過時刻の分布の計算

まず、式(15)、(17)に示した計算方法の妥当性を検討してみる。旅行速度の分布として対数正規分布を仮定する。対数正規分布は、それに従う確率変数の逆数の分布が再び対数正規分布になる上(速度分布から旅行時間分布を作成するのに便利)、対数変換によって容易に正規分布と相互に変換可能なので、計算機での関数発生に便利である。対数正規分布は、パラメータ  $\mu_L$ ,  $\sigma_L$  を用いて次のように表わされる。

$$q_v(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v v} e^{-(\ln v - \mu_L)^2 / 2\sigma_L^2}$$

$\mu_L$ ,  $\sigma_L$  と  $v$  の平均値  $\mu_v$ , 標準偏差  $\sigma_v$  の間には,  $\mu_v = e^{\mu_L + (\sigma_L^2/2)}$ ,  $\sigma_v = e^{2\mu_L} (e^{2\sigma_L^2} - e^{\sigma_L^2})$  の関係があり, 表-2に示した数値から容易に  $\mu_L$ ,  $\sigma_L$  が求められる。対数正規分布を用いて, 式(15), (17)により, 断面  $Y_0$  通過時刻の観測結果から断面  $S$  の通過時刻を計算してみた。図-8の下の図は断面  $Y_0$  を通過した 1012 台の自動車の通過時刻を示す。この分布から計算された断面  $S$  の通過時刻の分布を同図の上の図の折れ線で示す。棒グラフは観測された通過時刻である。両者はよく一致し, 上記計算方法が無理なく適用できることを示している。

### c) $\alpha$ の分布の推定

まず、 $t$ 軸、 $\alpha$ 軸を適当な区間に分割し、その代表座標点を  $\{t_i\}$ 、 $\{\alpha_j\}$  とする。式(13)中の  $t_s$  は、式(7)の  $\alpha$  に値を与えるつど決定されるので、式(13)に  $\alpha_j$  を代入することにより、任意の  $t_i$ について、

を与えることができる。この  $K_{ij}$  を用いて式 (12) を離散的に表現すれば、次のような。

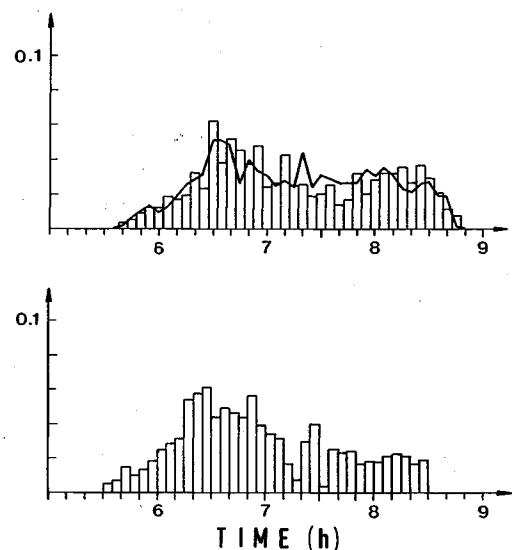


図-8 観測断面の通過時刻分布の計算方法のテスト

ここに,  $F_{ij} = \phi_a(\alpha_j) \Delta \alpha_j$  である.  $\Delta \alpha_j$  は数値積分のための重みで,  $\Delta \alpha_j = \sqrt{\alpha_j \alpha_{j+1}} - \sqrt{\alpha_j \alpha_{j-1}}$  のように与えればよい. 式 (13) に現われる  $\phi_{irx}(t - t_s | x_0, t_s)$  は時刻  $t_s$  に地点  $x_0$  を出発した場合の地点  $x$  の通過時刻の分布であるので, 式 (15), (17) によって計算する.

式(21)は連立方程式であるが、これに観測結果を代入して機械的に解くと、観測された通過時刻がランダム誤差を含むため、確率として  $F_j$  に課される制約、 $F_j \geq 0$ ,  $\sum F_j = 1$  を満たすことが保証されない。そこで最小  $\chi^2$  値法<sup>9)</sup>を採用した。これは  $\{F_j\}$  にある初期値を与え、式(21)で得られる  $\{\phi_{tpx}(t_i)\}$  と観測されたそれとの間の  $\chi^2$  値が小さくなるように  $\{F_j\}$  を修正し、 $\chi^2$  値が最小となった  $\{F_j\}$  をもって近似解とする方法である。すなわち、区間  $i$  について観測された通過時刻分布の区間頻度を  $F_i$ 、 $F_{i0} = N \cdot \phi_{tpx}(t_i) \Delta t_i$  を計算された区間頻度とし、 $\chi^2$  値の区分成分  $\chi_i^2$  を用いて、

とする。ここに、 $\Delta t_i$  は  $t$  軸の分割区間の幅である。本論文では、 $t_i$  は 5 分ごととし、 $\alpha_i$  は {0.01, 0.03, 0.05, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.90, 0.95} をとった。得られた断面  $Y_i$  の通過時刻の分布を図-7 の折れ線で示す。最小  $\chi^2$  値法を用いると得られた分布には自由度が無くなるので  $\chi^2$  検定で評価することはできないが、観測結果とこの折れ線とは比較的よく対応しており、計算が良好に行なわれたことを示している。得られた  $\alpha$  の分布を、前に述べたところにしたがって二つのルートの通行者数で加重平均して、通勤者全体の分布としたものを図-9 の実線で示す。 $\alpha$  の平均値は 0.415 である。この実線は、次の関数でよく近似できる。

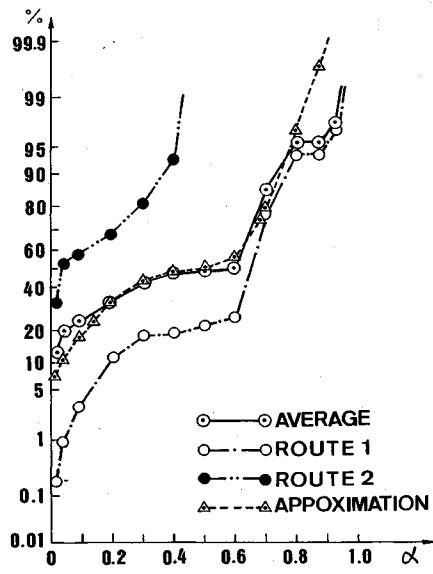


図-9  $\alpha$  の分布

$$\phi_i(\alpha) = \frac{A_i}{(2\pi\sigma_i^2)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{(\alpha - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right\}, \quad (i=1,2)$$

ここに、 $A_1=0.487$ ,  $\mu_1=0.139$ ,  $\sigma_1=0.116$ ,  $A_2=0.513$ ,  $\mu_2=0.68$ ,  $\sigma_2=0.065$ である。式(23)で得られる累積分布曲線を図中の破線で示す。対象とする集団が、このように二つの分布でよく近似できることは、それぞれの分布で代表される小集団にさらに分解される可能性を示している。

#### 4. 考察

本論文は、人間行動のモデル化に際して基本的には反証主義の立場に立つものである。反証主義では、モデル構成の根拠付けを必要としない。本論文でモデル構成の理由を述べたと見なし得るところがあれば、それは単に理解を容易にするための便法である。そのかわり反証主義では、ひとたびモデルが数値的に構成されたなら、その数値がテスト可能であること、およびひとたびテストに失敗したなら彌縫的にでもモデルを改訂することを要求する。この改訂は、それまで経てきたテストをすべてくぐりぬけられるものでなければならず、同じ形式のモデルのパラメータをその都度のデータにあわせてキャリブレーションしなおすことは許されない。このようなモデルの改訂が、モデルの拡張ないし発展とみなされるので、モデルのテストと改訂に都合がよいように、ミクロなモデル構成が尊重されるのである。

通勤者の出発時刻決定行動のモデルとして以前提案したもののは、公共交通機関の利用者に対して、テストをとりあえず通過したけれども<sup>9)-11)</sup>、すでに本論文で触れた

ように、自動車通勤者に対するテストは失敗した。本論文は、このテストに失敗したモデルを彌縫的に改訂しようとしたものということができる。

通勤者は、基本的には指定された時刻に遅刻しないことを行動の動機として出発時刻を決定するが、自動車通勤では、交通渋滞回避や駐車場占有も、出発時刻決定に大きな影響を与える。本論文では、駐車場占有行動が支配的でない条件下で、指定された到着時刻に遅刻しないことを動機とする行動が現われていないと考えられる通勤者を対象に、交通渋滞に応答する行動をモデル化した。通勤者全体に対しては、以前提案したモデルと本論文で提案するモデルとが並列に用いられることになる。モデルは一応、観測された自動車通勤者の出発時刻決定行動を再現した。しかし、本論文では、ルート選択が出発時刻選択と独立でないという立場（これは、出発時刻を決定する行動の個人差を前提として、ルート選択を考えるという意味である）に立つことが必要であったために、推定したパラメータをテストすることはまだできなかった。たとえば、観測点  $Y_0$  以遠を出発地とする通勤者に対する求められたパラメータで、 $Y_0$  から  $S$  までの範囲を出発地とする通勤者の行動を計算し、観測値と比較すればテストが可能であろうが、実はその計算のためには、通行料金に対する通勤者の評価を含めたルート選択行動が計算可能でなければならず、これはまた別のモデル化を必要とするので、目下のところ実行できないのである。さらに本論文では、平均旅行速度を用いて渋滞の非効用を定義した。しかし、渋滞に伴う不快感や運転労力の増大、走行上の危険性などが非効用を構成するとしたら、渋滞した道路上で要求される運転操作の程度と頻度を考慮した指標（例えば、加減速操作に結びつく先行車との車間距離と相対速度の関係など）の関数として非効用を定義することも考えられる。本論文では、より簡単な定義を採用したが、この点も将来再検討する余地がある。一方、このモデルは、経路上の渋滞の非効用を実質消費時間で測る、つまり渋滞の非効用というリンクコストを出発時刻を早めることに換算する構造を持つ。これは、ピーク交通量と配分交通量を整合的に予測する問題に一つの手がかりを与えるものと言えよう。

5. 結論

本論文では、経路上の交通渋滞に応答して自動車通勤者が出発時刻を決定する行動を記述するモデルを提案した。このモデルを環境条件に留意して選んだ通勤者集団に適用した結果、つきのような結論を得た。

① モデルは、平均旅行速度の関数として定義した非効用関数を用い、人の行動のばらつきを表現する確率変数をパラメータとして含んでいる。このモデルによって、通勤者の出発時刻の分布が比較的妥当に

再現できる。

- ② 自動車通勤者では、出発時刻選択とルート選択は独立でないと考えられる。将来、このモデルを、ルート選択モデルと併せてテストする必要がある。また、非効用関数を、より具体的な運転操作と結びついた他の指標の関数に置き換えることも、検討する必要がある。
- ③ モデルは、出発時刻を早めることの非効用でリンクコストを測る構造を持つので、ピーク交通量と配分交通量を整合的に予測するための基礎となる可能性がある。

**謝辞：**住宅・都市整備公団の野田隆弘氏、大林組の大枝良直氏は、それぞれある時期に共同研究者として本研究に参加して戴いた。また、東京理科大学の松本嘉司教授には終始熱心なご指導を戴いた。データの収集を快く御許可下さった株式会社マツダの関係者の方々、めんどうな作業をお願いした九州大学の壇 和喜技官にも、あわせて深謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) Sheffi, Y. : Urban transportation networks, Prentice-Hall, 1985.
- 2) 溝上章志・松井 寛・可知 隆：日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発、土木学会論文集 No. 401/IV

-10, 1989.

- 3) Alfa, A.S. : A Review of Models for the Temporal Distribution of Peak Traffic Demand. Transpn Res. B 20, pp.491~499, 1986.
- 4) Ben-Akiva, M.M., Cyna and A. De Palma : Dynamic Model of Peak Period Congestion, Transpn Res. A 18, pp.339~355, 1984.
- 5) Ben-Akiva, M., A. De Palma and P. Kanaroglou : Dynamic Model of Peak Period Traffic Congestion with Elastic Arrival Rate, Transpn Sci., 20 (2), pp.164~181, 1986.
- 6) Hendrickson, C. and E. Plank : The Flexibility of Departure Times for Work Trips, Transpn Res. A 18, pp.25~36, 1984.
- 7) Mahmassani, H.S. and G.L. Chang : Experiments with Departure Time Choice Dynamics of Urban Commuters, Transpn Res., B 20, pp.297~320, 1986.
- 8) 桑原雅夫・松本嘉司・島崎敏一・家田 仁：単一核都市内通勤トリフォのボトルネックへの到着分布の推定、土木学会論文集, No. 377/VI-6, 1987.
- 9) 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.
- 10) 角 知憲・村尾光弘・宮木康幸・松本嘉司：実質消費時間を使う通勤駅勢圈の推定、土木学会論文集, No. 347/VI-1, pp.135~144, 1984.
- 11) 角 知憲・宮木康幸・村尾光弘・松本嘉司：任意の運行特性を持つ公共交通機関利用者の一般化出発時刻、土木学会論文集, No. 347/IV-1, pp. 95~104, 1984.

(1991.6.12 受付)

## A DEPARTURE TIME CHOICE MODEL OF COMMUTERS BY PRIVATE CARS RESPONDING TO EN ROUTE TRAFFIC CONGESTION

Tomonori SUMI, Ryoji OKADA, Hiroshige SUGINO and Yasuyuki MIYAKI

The purpose of this paper is to propose a model to predict the departure time choice of commuters by private cars responding to road traffic congestion. The model is based on an assumption that commuters choose their departure times to minimize the sum of disutility derived from "Virtual Time Consumption" (time interval from departure time to work start time) and that due to traffic congestion. The disutility due to traffic congestion is defined as a function of the reciprocal of travel speed in the measure of VTC. The model was applied to commuters for a factory and it was revealed that the proposed model gave reasonable estimation of departure time distributions.