

# 任意の運行特性をもつ公共交通機関利用者の一般化出発時刻

## GENERALIZED DEPARTURE TIME OF USERS OF MASS TRANSIT SYSTEMS HAVING ARBITRARY OPERATIONAL CHARACTERISTICS

角 知憲\*・宮木康幸\*\*・村尾光弘\*\*\*・松本嘉司\*\*\*\*

By Tomonori SUMI, Yasuyuki MIYAKI, Mitsuhiro MURAO and Yoshiji MATSUMOTO

Generalized Departure Time is a response function of travellers who are appointed the place and time for arrival, and GDT gives their departure time as a function of the operational properties of transit system. The validity of such a concept is to be verified by the actual application in various cases because GDT is a "constructive concept" to be conjectured and the way of conjecture is not foregiven. This paper describes the method to estimate GDT of mass transit passengers in order to serve such verification. It also reports that commuters' GDTs estimated in HIROSHIMA and TOKYO are quite alike.

### 1. はじめに

多くの場合、交通はある目的を達成するためにやむを得ず派生する人の移動であって、移動それ自体が目的であることは少ない。この派生的な交通においては、移動のために費やす時間、コスト、労力など、もろもろの不利益をできるだけ小さくすることが人の行動の動機となる。特に、交通目的によって、目的地と到着時刻があらかじめ指定される場合には、移動のために費やす時間を小さくすることが、交通手段や交通経路の決定のための主要な判断基準の1つになるので、提供される交通サービスの関数として、この時間を把握することは、交通計画における基本的な要求の1つである。

目的地と到着時刻を指定された人が、所要時間の確率変動に対応して、交通のために実質的に割り当てる時間（出発時刻から到着指定時刻までの時間）を実質消費時間とよび、所要時間と実質消費時間を結ぶ構成概念<sup>1)</sup>

として一般化出発時刻を定義することはすでに提案した<sup>1)</sup>。

一般化出発時刻とは、任意の出発地を任意の交通手段によって出発する人の出発時刻を、到着指定時刻に対する遅刻確率で表わしたもので、特定の間人集団についてみれば、集団に固有の分布をする確率量であって、集団構成員の間に、出発地、目的地、交通手段の相違がある場合にも、その出発時刻を一律に評価できるところから、このように名づけたものである。

ところで、構成概念とは、人というシステムの応答を入力と因果的に結びつけて理解するための便宜的なものであるから、その構成方法は唯一ではない。構成方法によって、適用上の得失や適用範囲の大きさに相違が現われ得るので、提案された構成概念を受け入れることが妥当であるか否かは、広く実地に適用した結果で判断される。これは、実験科学の分野という追試という手続きに相当する。

前報では、鉄道利用通勤者を対象に、鉄道の運行頻度が著しく小さいため、乗車駅への徒歩アクセス行動が実質的に最終目的地を意識した一般化出発時刻を表現して

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

\*\* 正会員 工修 長岡技術科学大学助手 建設系  
(〒949-54 長岡市上富岡町 1603-1)

\*\*\* 正会員 工修 日本道路公団 (〒102 千代田区麩町 5-7-2)

\*\*\*\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科  
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

注1) 操作可能な環境条件(独立変数)と観測可能な人間の行動経過(従属変数)との関係から、仮説的に構成される概念である<sup>2)</sup>。

いると考えられる条件下で、一般化出発時刻という概念が成立することを実証した。しかし、このような条件が満たされることは少なく、追試はより緩やかな条件下で可能であることが望ましい。そこで、本論文では、任意の運行特性を有する公共交通機関の利用者を対象として、一般化出発時刻という概念を適用する具体的手法を示す。

ここで、公共交通機関の運行特性とは、その運行に關して運営者が操作可能な変数、すなわち、速度、定時性運行頻度および設定された運行時刻そのものを総して表わすものであるが、これらの変数の操作により、利用者の実質時間をどのように変化させることができるかが明らかになる。

次に、この手法を用いて、前報とは異なる都市の通勤者行動を分析して、一般化出発時刻という概念の成立を追試するとともに、その地域間比較を試みている。

2. 定時運行システム利用者の一般化出発時刻

(1) 定時運行システム利用者の出発時刻

人の行動特性を把握するためには、ある特定の個人を取り上げて、ある1つの支配要因のみに既知の変化を与え、応答を観測して、両者をつき合わせる方法と、1つの要因以外の支配要因が統制された条件下にある同質の集団を取り上げ、構成員の間にみられる要因の相違と行動の相違を比較する方法がある。一般化出発時刻は後者の方法に基づく概念である。人の行動は数学的に確定的なものでなく、確率的な表現をとる必要があるので、一般化出発時刻も行動の場合差と個人差とも含んだ確率量であると考え。この場合、場合差と個人差とを区別する必要がない。それは、一般化出発時刻が、所要時間の確率変動を支配する諸条件、すなわち、出発地・目的地の位置、交通手段と速度などから独立であると仮定するからである。個人差と場合差が異なるとしても、出発地・目的地の位置や行動の観測の中で、個人差を指摘することができなければ、集団を取り扱う限り個人差と場合差を区別しても無意味である。

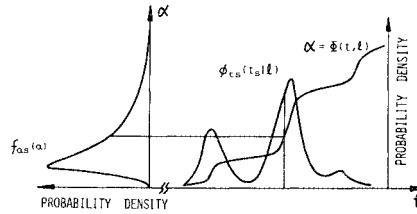
以下の記述では、仮想的な個人の行動を考えてみる。

この個人は、その集団に属する具体的な人間を意味するのではない。現実に存在する個々人は、集団の中からランダムに選ばれた個々人であると考え、数学的には、集団構成員のうちの誰であるかを特定できないという意味での仮想的な個人である。

いま、目的地と到着時刻を指定されたある人を考える。

その人は所要時間を随意に制御できないものとする。

出発地から目的地に至る所要時間が確率変動を有するとすると、その人は目的地における遅刻確率を十分小さな値にとどめる一方、できるだけ実質消費時間を小さく



図一1 一般化出発時刻と実出発時刻

するように出発時刻を決定する。この出発時刻を目的地における遅刻確率で表わしたものが一般化出発時刻であり、人間のある集団に固有な確率分布をすると考える。

図一1の右側に示すように、横軸に実時間軸  $t$  ととり、縦軸に遅刻確率  $\alpha$  と取る。時間軸原点  $t=0$  を到着指定時刻とする。  $t$  軸上の  $(-\infty, 0)$  の領域の任意の時刻  $t$  に出発時刻を選ぶとすると、交通手段を与えて  $t$  に対応する遅刻確率の値  $\alpha$  を与えることができる。急行列車などの追い越しを考えない限り、遅く出発するほど遅刻確率は増加するので、  $\alpha$  と  $t$  は単調な関係にある。この関係は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \alpha &\equiv \Phi(t, l) \\ &= \int_0^\infty \phi_{\alpha}(\tau | l, t) d\tau \\ &= \int_0^\infty \phi_{T_n}(\tau - t | l) d\tau \\ &= \int_t^\infty \phi_{T_n}(\tau | l) d\tau \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、  $t_a$  : 目的地到着時刻、  $T_n$  : 所要時間、  $\phi_{\alpha}(\tau | l, t)$  :  $l$  と  $t$  を条件とする  $t_a$  の確率密度関数 (以下、確率密度関数を PDF と書く)、  $\phi_{T_n}(\tau | l)$  :  $l$  を条件とする  $T_n$  の PDF、  $l$  : トリップ距離である。

式 (1) 中の  $t$  は負の値をもつことに注意しておく。

式 (1) は  $t$  から  $\alpha$  への変数変換を意味するので、  $\alpha$  は時間軸に遅刻確率を尺度とする目盛をつけたものである。この意味で  $\alpha$  軸を一般化時間軸とよび、  $\alpha$  軸上で運ばれた出発時刻  $\alpha_s$  を一般化出発時刻とよぶ。  $\alpha_s$  は  $\alpha$  軸上で確率分布をするものと仮定し、その PDF を図一1左側の  $90^\circ$  傾いた図のごとく  $f_{\alpha_s}(\alpha)$  で表わす。これを式 (1) の逆変換によって実時間軸上に投影したものが実際の出発時刻  $t_s$  の PDF を与える。

$$\phi_{t_s}(t | l) = f_{\alpha_s}(\alpha) \frac{d\alpha}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

ここに  $\phi_{t_s}(t | l)$  は、  $l$  を条件とする  $t_s$  の PDF である。

定時運行型の交通システムを利用する場合、ある便に乗り遅れると次の便まで待たされることになるので、  $\alpha$  は、図一1に示すように、階段状に上昇する。したがって、式 (2) は、階段の立ち上がりごとに、いくつかのピークをもつ出発時刻の分布を与える。

前報で取り扱ったケースは、実はこの階段が1つしか

ないケースであったとすることができる。

そこで問題は、式(1)の変換関係を公共交通機関利用者の場合について明らかにすることである。いま、図一2のように、複数の交通機関の組合せを考える。出発地  $O$  を出発した人は、徒歩または自転車などの個人交通手段によって最寄りの乗車駅  $S_1$  に至る。 $S_1$  で乗車後  $S_2$  駅にて他の公共交通機関に乗り換え、最終下車駅  $S_3$  に至る。 $S_3$  で下車後、再び個人交通手段で目的地  $D$  に向かう。

以下の取り扱いでは、 $S_1S_2$  間は定時運行する比較的運行頻度の小さい鉄道のようなシステムを、 $S_2S_3$  間は高頻度で定時性のない運行をし、速度が確率変動を有するバスなどの路面交通システムを想定する。むろん、このような組合せは、任意に行うことができる。

記号を表一のように定義する。

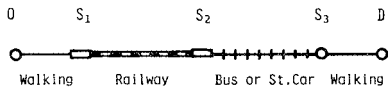
$t_{a1}$  と  $t_s$ ,  $T_{na}$  には次の関係がある。

$$t_{a1} = t_s + T_{na} \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi_{ta1}(t | t_s, l_a) = \phi_{rna}(t - t_s | l_a) \dots\dots\dots (4)$$

乗客は  $S_1$  に到着後、最初の出発便に乗車するものとする、第  $k$  便に乗車する確率  $P_k(l_a, t_s)$  は次のように表わされる。

$$P_k(l_a, t_s) = \int_{t_s^{k-1}}^{t_s^k} \phi_{ta1}(t | t_s, l_a) dt \dots\dots\dots (5)$$



図一2 公共交通機関の利用方法の例

表一 主要な記号対照表

記号	意味	PDF
$l_a$	$O-S_1$ 間距離	$g_{l_a}(l   l_a, l_a)$
$l_c$	$S_2$ 駅内乗り継ぎ歩行距離	確定値
$l_2$	$S_2S_3$ 間距離	$g_{l_2}(l   l_2)$
$l_e$	$S_3D$ 間距離	$g_{l_e}(l)$
$v_a$	$O-S_1$ 間移動速度	$q_{v_a}(v)$
$v_c$	$S_2$ 駅乗り継ぎ歩行速度	$q_{v_c}(v)$
$v_2$	$S_2S_3$ 間移動速度	$q_{v_2}(v)$
$v_e$	$S_3D$ 間移動速度	$q_{v_e}(v)$
$t_s^k$	$S_1S_2$ 間第 $k$ 便の $S_1$ 出発時刻	確定値
$t_s^k$	$S_1S_2$ 間第 $k$ 便の $S_2$ 到着時刻	確定値
$t_s$	$O$ の出発時刻	$\phi_{ts}(t   l_a, l_2, l_e)$
$t_{a1}$	$S_1$ への到着時刻	$\phi_{ta1}(t   t_s, l_a)$
$t_{a2}$	$S_2$ への到着時刻	$\phi_{ta2}(t   k)$
$t_{a2}$	$S_2$ の出発時刻 (乗りつき交通機関)	$\phi_{ta2}(t   k)$
$t_{a3}$	$S_3$ への到着時刻	$\phi_{ta3}(t   k, l_2)$
$t_{aD}$	$D$ への到着時刻	$\phi_{taD}(t   k, l_2, l_e)$
$T_{na}$	$O-S_1$ 間所要時間	$\phi_{Tna}(t   l_a)$
$T_{nc}$	$S_2$ 駅内乗り継ぎ歩行時間	$\phi_{Tnc}(t)$
$T_w$	$S_2$ 駅内乗り継ぎ待ち時間	$\phi_{Tw}(t)$
$T_{n2}$	$S_2S_3$ 間所要時間	$\phi_{Tn2}(t   l_2)$
$T_{ne}$	$S_3D$ 間所要時間	$\phi_{Tne}(t   l_e)$
$t_{a1}'$	$l_a, l_c$ を与えられた乗客集団の $S_1$ 駅到着時刻	$\phi_{ta1}'(t   l_a, l_c)$
$t_{a10}$	乗客全体の $S_1$ 駅到着時刻	$\phi_{ta10}(t)$

以下、 $l_a$  に関する条件の表記を省略する。

$S_2$  に到着後、 $l_c$  を歩行するので、 $t_{a2}$  は次のように与えられる。

$$t_{a2} = t_s^k + T_{nc} \dots\dots\dots (6)$$

$$\phi_{ta2}(t | k) = \phi_{Tnc}(t - t_s^k) \dots\dots\dots (7)$$

$S_2$  で乗り継ぎ便を待つことを考えると、 $t_{a2}$  は、

$$t_{a2} = t_{a2} + T_w \dots\dots\dots (8)$$

$$\phi_{ta2}(t | k) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{ta2}(\tau | k) \phi_{Tw}(t - \tau) d\tau \dots\dots\dots (9)$$

であり、 $t_{a3}$  は、

$$t_{a3} = t_{a2} + T_{n2} \dots\dots\dots (10)$$

$$\phi_{ta3}(t | k, l_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{ta2}(\tau | k) \phi_{Tn2}(t - \tau | l_2) d\tau \dots\dots\dots (11)$$

となる<sup>12)</sup>。したがって、 $t_{aD}$  は、

$$t_{aD} = t_{a3} + T_{ne} \dots\dots\dots (12)$$

$$\phi_{taD}(t | k, l_2, l_e) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{ta3}(\tau | k, l_2) \phi_{Tne}(t - \tau | l_e) d\tau \dots\dots\dots (13)$$

と与えられる。いま、第  $k$  便を利用する場合の遅刻確率を  $\alpha_k(l_2, l_e)$  と表わすと、

$$\alpha_k(l_2, l_e) = \int_0^{\infty} \phi_{taD}(t | k, l_2, l_e) dt \dots\dots\dots (14)$$

となる。ここで、 $t=0$  を到着指定時刻にとったことに注意されたい。

式(14)を用いると、出発時刻  $t_s$  に対する遅刻確率  $\alpha$  は、

$$\alpha = \sum_{k=1}^n P_k(l_a, t_s) \alpha_k(l_2, l_e) \dots\dots\dots (15)$$

$$\equiv \Phi(t_s, l_a, l_2, l_e) \dots\dots\dots (15)$$

と計算することができる。

式(2)に代入すべき  $da/dt_s$  は、

$$\frac{d\alpha}{dt_s} = \sum_{k=1}^n \frac{dP_k}{dt_s} \alpha_k$$

$$= \sum [\phi_{Tna}(t_s^{k-1} - t_s | l_a) - \phi_{Tna}(t_s^k - t_s | l_a)] \alpha_k \dots\dots\dots (16)$$

と与えられる。ここに  $n$  は利用可能便数である。

$T_{na}, T_{nc}, T_{n2}, T_{ne}$  の確率変動がそれぞれ移動速度の確率変動によるものとすれば、その PDF は、

$$\phi_{Tna}(t | l_a) = l_a / t^2 \cdot q_{v_a}(l_a / t) \dots\dots\dots (17)$$

$$\phi_{Tnc}(t | l_c) = l_c / t^2 \cdot q_{v_c}(l_c / t) \dots\dots\dots (18)$$

$$\phi_{Tn2}(t | l_2) = l_2 / t^2 \cdot q_{v_2}(l_2 / t) \dots\dots\dots (19)$$

$$\phi_{Tne}(t | l_e) = l_e / t^2 \cdot q_{v_e}(l_e / t) \dots\dots\dots (20)$$

注2) 道路交通速度は道路の混雑状況によって時間帯により変動する。また、ある1日と他の1日とで異なるという意味でのアンサンブルな変動も大きい。軌道敷内に一般自動車の乗入れを規制した路面電車、優先もしくは専用車線を指定されたバス以外で、路線距離が短くない場合は、所要時間を出発時刻の関数とし、長期間にわたるアンサンブル変動を使用するなどの配慮が必要である。

で与えられる<sup>注3)</sup>。また、乗り継ぎ交通機関が道路交通機関であって運行のばらつきが大きく、一方、運行頻度も十分大きいので、その発車がポアソン分布をなすと考えると、 $\phi_{T_w}(t)$ は、

$$\phi_{T_w}(t) = \lambda e^{-\lambda t} \dots \dots \dots (21)$$

となる。ここに $\lambda$ は平均待ち時間で、平均運行間隔の1/2をとる。式(3)~(14)に、式(17)~(21)を代入することにより、式(15)、式(16)を計算することができる。

(2) 一般化出発時刻の推定方法

いま、式(2)中の $\phi_{i_s}(t|l)$ を改めて $\phi_{i_s}(t|l_a, l_2, l_e)$ と表わす。

これを用いて、 $t_{a1}$ のPDFは次のように表わされる。

$$\phi_{i_{a1}}(t|l_a, l_2, l_e) = \int_{-\infty}^0 \phi_{i_s}(\tau|l_a, l_2, l_e) \phi_{T_{na}}(t-\tau|l_a) d\tau \dots \dots \dots (22)$$

$l_2, l_e$ を条件とする乗客の $S_1$ 駅到着時刻 $t_{a1}$ のPDFは

$$\phi'_{i_{a1}}(t|l_2, l_e) = \int_0^{l_{a0}} \phi_{i_{a1}}(\tau|l_a, l_2, l_e) g_{i_a}(l|l_2, l_e) dl \dots \dots \dots (23)$$

である。ここに $l_{a0}$ は $l_a$ の上限である。

式(22)に式(2)を代入し、さらにこれを式(23)に用いると、次式を得る。

$$\phi'_{i_{a1}}(t|l_2, l_e) = \int_0^{l_{a0}} \int_0^1 \phi_{T_{na}}(t-t_s|l_a) f_{\alpha_s}(\alpha) \cdot da g_{i_a}(l|l_2, l_e) dl \dots \dots \dots (24)$$

$l_2, l_e$ の分布を考えて、利用者全体の $S_1$ 駅到着時刻 $t_{a1}$ のPDFは、

$$\phi_{i_{a1}}(t) = \int_0^{l_{e0}} \int_0^{l_{20}} \int_0^{l_{a0}} \int_0^1 \phi_{T_{na}}(t-t_s|l_a) f_{\alpha_s}(\alpha) \cdot da g_{i_a}(l_a|l_2, l_e) g_{i_2}(l_2|l_e) g_{i_a}(l_e) dl_e dl_2 dl_a \dots \dots \dots (25)$$

となる。ここに、 $l_{e0}, l_{20}$ はそれぞれ $l_e, l_2$ の上限である。

ここで、 $t_s$ と $\alpha$ の間に式(15)の関係があることを注意しておく。

$\alpha$ は $l_a, l_2, l_e$ に対して独立であると仮定しているので、式(25)の積分の順序を交換することができ、

$$\phi_{i_{a1}}(t) = \int_0^1 K_2(t, \alpha) f_{\alpha_s}(\alpha) da \dots \dots \dots (26)$$

$$K_2(t, \alpha) = \int_0^{l_{e0}} \int_0^{l_{20}} \int_0^{l_{a0}} \phi_{T_{na}}(t-t_s|l_a) g_{i_a}(l_a|l_2, l_e)$$

注3) アクセス、乗り継ぎ、イグレスが徒歩で行われる場合、歩行速度がおのおのの独立には定まらないことを想定すれば、式(15)のように列車の乗車確率と乗車列車を条件とする遅刻確率に分離して扱うことができず、歩行速度を条件として式(3)以下の演算を目的地到着まで実行したうへ歩行速度のPDFをかけて積分することになる。本論文では、歩行時間より道路交通時間の変動の寄与が大きいことを想定して、簡明な表現をとったが、アクセス、乗り継ぎ、イグレスで同一の歩行速度を用いる計算も可能である。

$$\cdot g_{i_2}(l_2|l_e) g_{i_e}(l_e) dl_e dl_2 dl_a \dots \dots \dots (27)$$

を得る。式(26)は前報に示したのと同様のフレドホルム形積分方程式である。したがって、同様に代表座標点を用いて連立方程式に変換し、 $\phi_{i_{a1}}(t), g_{i_a}(l|l_2, l_e), g_{i_2}(l_2|l_e), g(l_e)$ を調査のうへ、 $q_{v_0}(v), q_{v_2}(v), q_{v_e}(v), t_s^k, t_a^k, l_c, \phi_{T_w}(t)$ を与えて、最小 $\chi^2$ 値法で解くことができる(Appendix参照)。

なお、以上の取り扱いに際して、到着指定時刻を時間軸の原点とし、これに対する相対的な時間による記述を行っている。しかし、到着指定時刻が単一でない場合、 $S_1$ 駅では複数の集団の到着が観測される。いま、その集団がいずれも同一の $f_{\alpha_s}(\alpha)$ をもつものとするれば、式(26)にかわり、次式を解くことになる。

$$\phi'_{i_{a1}}(t) = \sum_{i=1}^N k_i \phi'_{i_{a1}}(t) \dots \dots \dots (28)$$

ここに、 $\phi'_{i_{a1}}(t)$ :  $S_1$ 駅に到着する全乗客の到着時刻のPDF、 $N$ : 到着指定時刻の異なる集団の数、 $k_i$ :  $i$ 番目の到着指定時刻を有する集団の全乗客に対する割合、 $\phi'_{i_{a1}}(t)$ :  $i$ 番目の到着時刻PDFで式(26)と同じものである。

3. 適用性の検討

(1) 適用対象

以上の方法の適用性を広島県佐伯郡大野町の国鉄山陽本線大野浦駅で乗車し、広島市に通勤する乗客を対象として検討してみた。表一2に山陽本線上の時刻表の一部を示す。

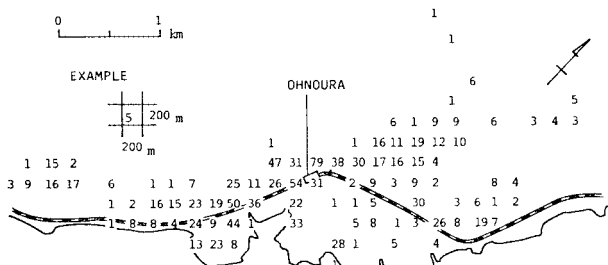
表一2 山陽本線(上)時刻表(昭和57年7月現在)

大野浦	7:00	7:16	7:41	8:07	8:28	8:51
宮島口	7:05	7:21	7:46	8:13	8:33	8:57
廿日市	7:11	7:28	7:53	8:20	8:39	9:04
五日市	7:15	7:31	7:57	8:23	8:43	9:08
西広島	7:21	7:38	8:04	8:30	8:49	9:15
横川	7:25	7:41	8:08	8:33	8:53	9:19
広島(着)	7:28	7:46	8:12	8:37	8:57	9:23

(2) 出発地・目的地の調査と $l_a, l_2, l_e, l_c$ の推定

広島市とその近郊各駅の通勤定期券発行原票のうち、大野浦駅を乗車駅とする上り線乗客の昭和57年5月~7月の3か月分を全数調査し、住所、勤務先の位置を地図上にプロットした。図一3は大野浦乗車通勤者の住所を、200m×200mの正方形ゾーン内におちる購入定期券延べ月数で示したものである。 $l_a$ は、通勤者住所と駅との道路距離で与えられる。

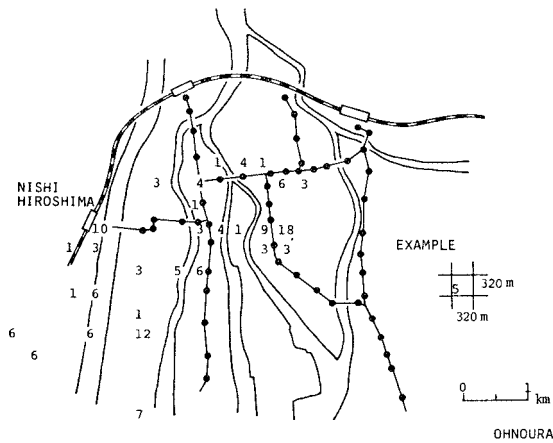
図一4~6には、これら乗客のうち、西広島、横川、広島各駅で下車する者の勤務先所在地を図一4と同様に示した。乗客は、これら国鉄駅で下車後、通勤先が近い場合は徒歩で、そうでない場合は路面電車またはバス



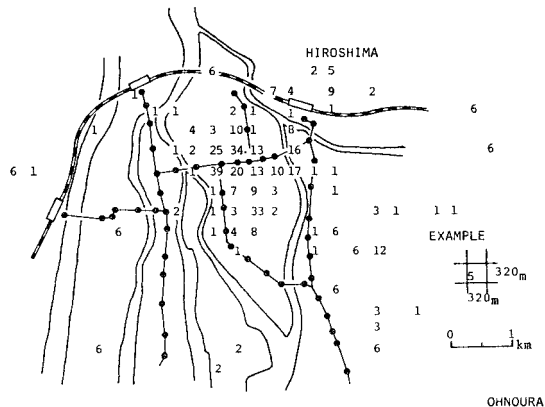
図一3 大野浦駅乗客の出発地分布

表一3 バス・市電運行時隔

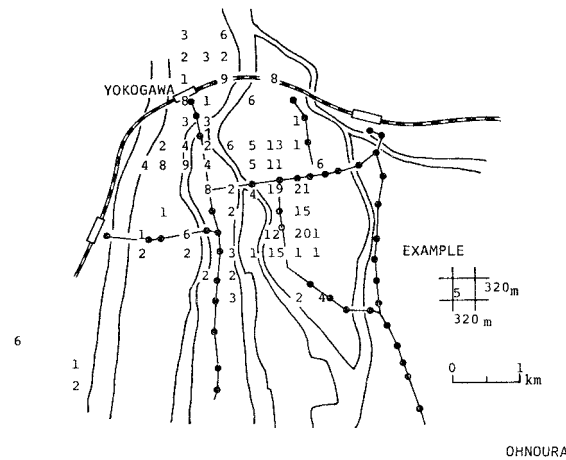
路線 No.	西 広 島	横 川	広 島
1	5.0分	10.0分	9.4分
2	6.7	6.5	4.4
3	7.0	2.3	7.1
4	5.0	7.0	5.2
5		5.7	13.0
6		2.3	3.0
7		15.0	10.0
8			15.0
9			5.0
10			6.0
11			6.5
12			8.5
13			4.5
14			5.5



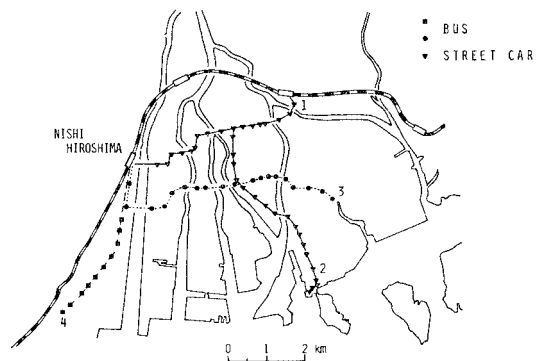
図一4 大野浦駅乗客の目的地 (西広島下車)



図一6 大野浦駅乗客の目的地 (広島駅下車)



図一5 大野浦駅乗客の目的地 (横川駅下車)



図一7 西広島經由路面電車・バス路線図

に乗り継いで通勤先へ向かう。そこで、国鉄各駅から利用可能な路面電車、バス路線のうち、通勤先に最も近い停留所を与える路線を利用するものとする。国鉄駅前の路面電車、バスの停留所から勤務先最寄りの停留所までの路線長が  $l_2$  を与える。  $l_e$  は、  $l_a$  と同様に、最寄りの

の停留所から勤務先までの道路距離を与えればよい。

図一7, 8, 9には、国鉄3駅から利用可能な路面電車、バス路線を、表一3にはその通勤時間帯内運行時隔を示しておく。

なお、勤務先が、国鉄3駅から道路距離で500m以下の場合には、通勤者は乗り継ぎ公共機関を利用せず、徒

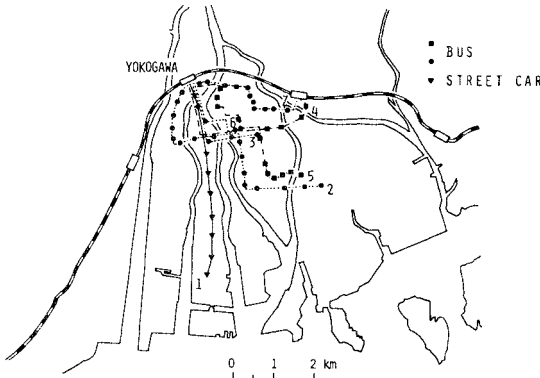


図-8 横川駅経由路面電車・バス路線図

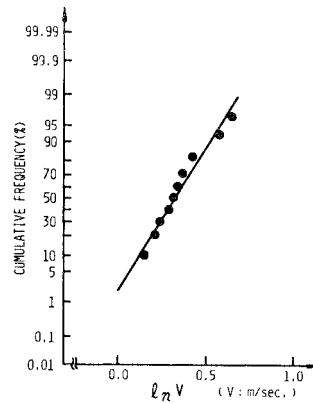


図-10 歩行速度<sup>1)</sup>

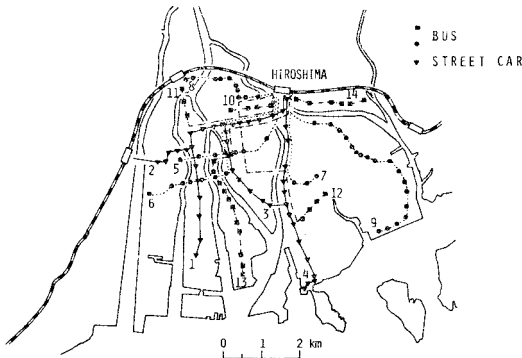


図-9 広島駅経由路面電車・バス路線図

歩で目的地に向かうものとした。

$l_c$  は、駅により乗り継ぎ路線により多少の相違があるものの、待ち時間や  $l_2$  区間の所要時間に比べ、この区間の歩行時間の影響は十分小さいことから、簡単のため一律 150 m とした。

(3)  $v_a, v_c, v_2, v_e$  の測定

$v_c, v_e$  および乗客の一半について  $v_a$  は歩行速度で与えられる。歩行速度はすでに測定しているので、それを使用した<sup>1)</sup>。図-10 は歩行速度を示すものである。歩行速度  $v_w$  の密度関数  $q_{vw}(v)$  は、図中の直線のごとく、

$$q_{vw}(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w v} e^{-\ln v - \mu_w / 2\sigma_w^2} \dots \dots \dots (29)$$

$$\mu_w = 0.328, \sigma_w = 0.162$$

と表わされる。

乗客の一半は、自転車を使用して大野浦駅へ到着する。

したがって、式 (24) の計算は、徒歩から自転車への転換率曲線を用いて、 $l_a$  の分布を歩行者、自転車利用者に分割し、両者別々に行う必要がある。

アクセス手段として、徒歩、自転車、バスの3つが考えられる場合、おのおの利用率を調査し、アクセス距離ごとに整理した結果が公表されている<sup>3)</sup>。これによ

ば、駅からの距離が大きくなるにつれて、主な利用手段が、徒歩、自転車、バスの順で変化していることがわかる。自転車所有のための負担には全国的に地域差がないと考えられること、したがって、徒歩から自転車への転換は、所要時間と労力の節約を主な動機とし<sup>4)</sup>、人間の生理的条件で支配されること、また、大野浦と上記調査の行われた地域で、地形的にも、対象とする人間集団にも特に差異があるとは考えられないことから、アクセス手段の徒歩から自転車への転換は、上記調査結果と同様に行われると考えられる。大野浦駅乗客は、事実上バスを利用していないところから、上記調査結果のうち、自転車とバスの利用率を合算して、転換率曲線を作成した。この転換率曲線を図-11 に示す。

自転車速度  $v_{cy}$  は、広島市および船橋市において、それぞれ 100 m, 50 m の区間を走行する通勤者 70 名および 66 名の所要時間を計測して求めた。結果を図-12 に示す。これは、平均 4.15 m/s, 標準偏差 0.62 m/s であって、 $q_{vcy}(v)$  は次のように表わされる。

$$q_{vcy}(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{cy}v} e^{-\ln v - \mu_{cy} / 2\sigma_{cy}^2} \dots \dots \dots (30)$$

$$\mu_{cy} = 1.406, \sigma_{cy} = 0.191$$

$v_2$  は路面電車もしくはバスの速度である。前記国鉄 3 駅から CBD に至る主要な路線上で、通勤時間帯内 (AM 7:00~9:00) の走行速度を車両番号照合法に

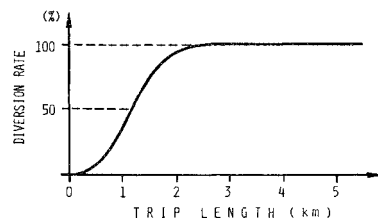


図-11 自転車転換率

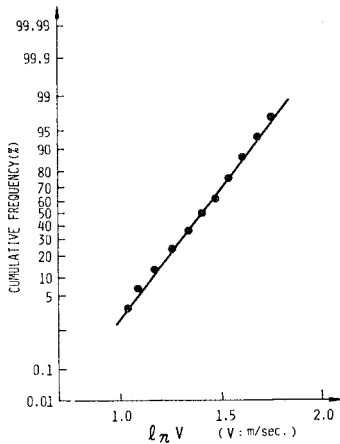


図-12 自転車速度

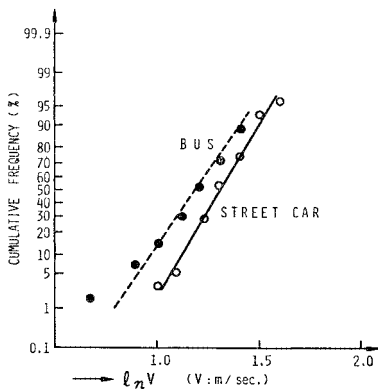


図-13 路面電車・バス速度

表-4 路面電車・バス運行速度

	測定区間	区間長	測定台数	平均速度	標準偏差
路面電車	広島駅一八丁堀	1.45 km	62 台	3.35 m/s	0.42 m/s
	西広島一紙屋町	3.23 km	72 台	3.45 m/s	0.56 m/s
	合計		134 台	3.41 m/s	0.50 m/s
バス	広島駅一八丁堀	1.40 km	26 台	3.34 m/s	0.38 m/s
	横川一紙屋町	2.43 km	27 台	2.92 m/s	0.38 m/s
	合計		71 台	3.01 m/s	0.49 m/s

より計測したところ、図-13の結果を得た。このときの計測条件は表-4のとおりである。

路面電車の速度は平均 3.41 m/s、標準偏差 0.50 m/s、バスの速度は、それぞれ 3.0 m/s、0.49 m/s であった。

$q_{v_2}(v)$  は次の関数で表わされる。

$$q_{v_2}(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{v_2}} e^{-0.1nv - \mu_{v_2}v^2 / 2\sigma_{v_2}^2} \dots (31)$$

$\mu_{v_2} = 1.215, \sigma_{v_2} = 0.1448$  (路面電車)

$\mu_{v_2} = 1.088, \sigma_{v_2} = 0.1686$  (バス)

(4) 到着指定時刻の調査

国鉄通勤定期発行原票に記入された広島市内事業所のうち、ランダムに 25 社従業員約 1 万人を選び、その始業時刻を調査したところ、2/3 はほぼ 8 時 30 分、残りのほとんどは 8 時 50 分と 9 時であった。計算にあたっては、簡単のため、2/3 が 8 時 30 分、残りが 9 時であるとした<sup>4)</sup>。

(5) 大野浦駅到着時刻の計測

乗客が大野浦駅改札口に到着する時刻を歩行者と自転車利用者に分けて計測し、改札口からプラットフォームまでの歩行時間を加算し、プラットフォーム到着時刻を求めたものを図-14の棒グラフで示す。

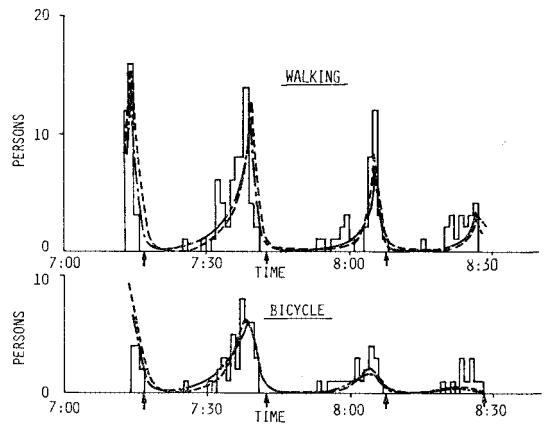


図-14 大野浦駅乗客到着時刻

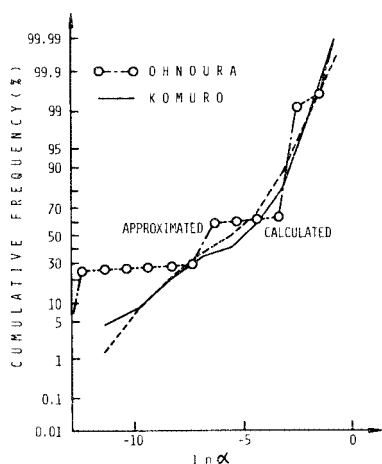
(6) 一般化出発時刻の推定結果

式 (27) に以上のデータを使用し、Appendix に示す方法を適用して得た乗客の到着時刻分布計算結果を、図-14 中の一点鎖線で示す。図中に記入した矢印は列車の発車時刻である。これは観測結果と比べ、 $\chi^2$  値による適合度検定で有意水準 0.5% の適合度を示しており、よく適合している。このとき推定された一般化出発時刻を累積分布曲線として図-15 に示す。同図中の実線および破線は、前報で示した東京圏通勤者のものおよびその近似曲線である。

この図では、大野浦駅旅客に対して求められた  $f_{a_s}(a)$  の区間確率が不規則に変化し、東京圏通勤者のそれと比較して、 $a$  の小さい領域で差異があることが認められる。

しかし、図中に示した分布は、いわば  $f_{a_s}(a)$  の観測結

注 4) 就業時刻調査のサンプル率は広島市内の就業人口約 47 万人に対して 2% 強にしかならず、必ずしも十分ではない。しかし、国鉄・私鉄の営業担当者から聴取した情報とほぼ一致したので、この調査結果を採用した。なお、始業時刻 8 時 50 分であるにもかかわらず 9 時始業にまとめた人は、約 14% の割合を占め、したがって計算結果に相応の誤差を生じることを付記する。



図一五 一般化出発時刻の推定結果

果に相当するもので、東京圏に比べて少数の旅客観測数に基づいて推定した大野浦駅旅客の  $f_{\alpha_s}(\alpha)$  に、このような点がみられるのは、やむを得ないことである。同図中にプロットされた各点は、観測された旅客の到着時刻をすべて一律に用いて算定されるので、個々の点にサンプル数という概念が存在せず、両者の適合度を直接検定することができない。サンプル数という概念が成立するのは時間軸上で定めた区間ごとの到着旅客数であるから、両者の与える到着旅客数を時間軸の上で比較してみる。

式(24)に対して、 $f_{\alpha_s}(\alpha)$  だけ図中の近似曲線を代入し、他は大野浦駅利用者のデータを用いて計算した大野浦駅到着時刻分布を、図一14中の破線で示しておく。破線は、一点鎖線ときわめてよく一致しており、東京圏通勤者が大野浦駅利用者と同じ条件下におかれれば、きわめてよく似た行動をとることがわかる。

なお、以上の計算では、列車の発車時刻の観測結果に基づき、発車時刻を定刻より45秒遅らせてある。乗客は、定刻に改札口を通過すれば、駆け足で乗車できるという点で、この遅れを経験的に知っているものと推測できる。

#### 4. 考 察

一般化出発時刻という概念は、出発地・目的地の位置、その間の交通手段とその運行特性という、人間の外にある時間に関する要因の一切を、所要時間の確率分布に集約し、これを入力とし、出発時刻を出力とする人間というシステムの応答関数として定義される。これは、ある意味で人間のもつ多様性を取捨し、適用する状況を限定したうえで、人間そのものを抽象化した概念であり、交通を行う人間のおかれた時間的要因以外の交通条件、および、社会的、経済的諸制度や文化的背景などをひっくり返して、その一面に数量的表現を与えたものということ

ができる。このような観点からすれば、時間要因以外の交通条件に特に差があるとは考えられず、社会的経済的の制度や文化的背景にも本質的に差があるとは思えない東京と広島通勤者が類似の交通条件のもとで、類似の一般化出発時刻を有することは十分考えられることである。同時に、広島と東京のほかにも、わが国内で通勤者が同様の特性を有する地域が広く存在する可能性が大きい。

一方、一般化出発時刻は、入力の変化と出力の変化とを比較するという操作の手順によって定量化されており、交通機関の運行特性とは独立な概念である。したがって、交通機関の運用方法を調整し、入力である所要時間の確率分布を操作することにより、出力である出発時刻および実質消費時間を操作することができる。交通機関や経路の選択問題では、時間的要因が大きな役割を果たすことは明らかである。本論文で示した方法で交通を行う人の一般化出発時刻を定量化することは、機関分担や経路選択行動に対し、政策的な誘導や介入を試みる場合に、有益な情報を提供するものと考えられる。

なお、一般化出発時刻の数量的表現については、さらに次の点で検討の余地があると考えている。

一般化出発時刻の推定は、観測した旅客の乗車駅への到着時刻と、一般化出発時刻を用いて計算したそれとの適合度を最大とする  $\chi^2$  値最小化法によって行っている。この場合、 $\chi^2$  値そのものに絶対的規準を置くのではない以上、一般化出発時刻は、唯一絶対的に定まるものではない。したがって、その数量的表現の適否は、それをを用いて得られる結果の妥当性と比較して判断されるものである。この点からいえば、一般化出発時刻の表現は、精緻化、簡略化の両方の可能性を含めて、今後適用例と適用範囲を拡大していく中で、検討されるべき課題である。

#### 5. 結 論

一般化出発時刻とは、目的地と到着時刻を指定された人が、所要時間の確率変動に応じて出発時刻を決定する行動において、人の応答関数として定義される概念である。本論文は、この概念を、任意の運行特性を有する公共交通機関とその組合せシステムの利用者に拡張して適用する方法を明らかにしてこの概念の成立を異なる地域で検証可能としたものである。

本論文によって得られた結論は次のとおりである。

(1) 一般化出発時刻という概念は、目的地と到着時刻を指定される公共交通機関利用者にもそのまま適用できる。

(2) 公共交通機関の運行特性がいかなるものであっても、出発時刻と遅刻確率の関係を与えることによって、乗車駅に到着する乗客の到着時刻を計測し、その目的地



と出発地を調査して、一般化出発時刻を推定することができる。

(3) 広島近郊から市内へ通勤する鉄道利用者の一般化出発時刻は、実質的に東京近郊に通勤する鉄道利用者のそれと同じである。

以上のとおり、任意の運行特性を有する交通機関利用者に一般化出発時刻という概念を適用する方法が明らかになった。一般化出発時刻の数量的把握や、自動車交通への適用など、さらに検討を続ける必要が残されているが、今後は、これに基づいて、交通機関や経路の選択行動の考察を進めることが可能である<sup>5)</sup>。

### 6. あとがき

この研究を行うにあたり、国鉄広島鉄道管理局および広島電鉄株式会社には、快く調査・観測をご許可いただき、また懇切なご支援を得た。さらに、株式会社大林組 本田 敦氏、東京大学大学院 中野宏幸氏をはじめ、もと東大工学部土木工学部の学生諸氏には、大学院学生諸氏とともに、調査・計測、データ整理、あるいは数値計算に、広範な協力を受けた。付記して謝意を表する。

### Appendix 最小 $\chi^2$ 値法による積分方程式の解法

#### (1) 代表座標点を用いる連立方程式への変換

式 (26) の積分方程式は、次のようにして連立方程式に変換される。

$t$  軸、 $\alpha$  軸を適当な区分区間に分割し、その区間の代表的座標値 (これを代表座標点とよぶ) を  $t_i$ 、 $\alpha_j$  と書く。

式 (27) 中の  $t_i$  は、式 (15) 左辺に  $\alpha_j$  を与えることにより決定されるので、式 (27) は、 $t_i$ 、 $\alpha_j$  の組合せごとに求めることができる。こうして求められた値を  $K_{ij}$  と書き、マトリックスで表わす。

いま、 $\{P_i\}$  を  $\{\phi_{i\alpha_0}(t_i)\}$  によってつくられるベクトル、 $\{F_j\}$  を  $\{f_{\alpha_0}(\alpha_j) \cdot \Delta\alpha_j\}$  によってつくられるベクトルとすると、式 (26) は、

$$\{P_i\} = [K_{ij}] \{F_j\} \dots \dots \dots (32)$$

と、連立方程式になる。ここに  $\Delta\alpha_j$  は数値積分のための  $f_{\alpha_0}(\alpha_j)$  に対する重みである。

座標座標点の選び方は特に制限がないが、前報では、以下に述べる最小  $\chi^2$  値法を容易に行うため、はじめに  $t_i$  を設定し、次の  $[K_{ij}]$  の対角要素が各列ベクトル中最大値をとるよう  $\alpha_j$  を決定した。しかし、この方法では、 $\alpha_j$  を決定するまでに何回かの収束計算を要するにもかかわらず、 $t_i$  の分布が広がると、対角項と他の要素の差が減少してきて、最小  $\chi^2$  値法を実行するうえでの利点が小さくなる。そこで、 $[K_{ij}]$  をより簡易に作成するとともに、 $t_i$  と  $\alpha_j$  を独立に決定して、一方で最小  $\chi^2$  値

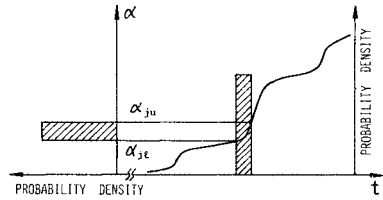


図-16  $K_{ij}$  の作成

法の計算効率を上げることを考えてみる。

$[K_{ij}]$  マトリックスの列ベクトルの意味は、出発時の遅刻確率を、 $\alpha$  軸上のある区分区間  $\alpha_j$  に指定した場合の  $t_{\alpha_0}$  の区間確率ベクトルである。そこで、図-16に示すように、区間  $\alpha_j$  の下限を  $\alpha_{jl}$ 、上限を  $\alpha_{ju}$  として、この間に矩形形状に分布する面積 1 の確率密度を考える。式 (15) の関係を与えれば、その逆関数を用いて  $\alpha_{jl}$ 、 $\alpha_{ju}$  に対応する出発時刻  $t_{sl}$ 、 $t_{su}$  を求めることができる。出発時刻の分布は、 $t_{sl}$  から  $t_{su}$  までの間に面積が 1 となるように分布するので、 $t_{sl}$  と  $t_{su}$  の間隔が十分小さいなら、この間に面積 1 の矩形の出発時刻の PDF を与える。 $t_{sl}$  と  $t_{su}$  の間が大きいなら、さらに  $\alpha_{ju}$ 、 $\alpha_{jl}$  の間を分割し、分割点ごとに対応する  $t$  軸上の点を求めたうえ、その点の間に分割区間の面積に一致する矩形分布を与えて出発時刻の PDF を作る。

これにアクセス所要時間の PDF をたたみ込み積分すれば  $t_{\alpha_0}$  の PDF となる。このような手順を、出発地、目的地、交通手段を与える都度繰り返し、おのおのの重みをかけて加算することにより、乗客全体を対象として、 $\alpha_j$  を条件とする  $t_{\alpha_0}$  の PDF が求まる。PDF が求まれば、 $t_i$  を  $t$  軸上で任意に選んで  $[K_{ij}]$  を作成することができる。

#### (2) 最小 $\chi^2$ 値法

上記のように  $[K_{ij}]$  を作成し、 $\{P_i\}$  に観測データを代入して、式 (32) を解くと、 $\{P_i\}$  が、ランダム変動を含むため  $\{F_j\}$  は確率として  $F_j$  に課される制約、すなわち、 $F_i \geq 0$ 、 $\sum F_j = 1$  を満たすことが保証されない。そこで、 $\{F_j\}$  にある初期値を与え、式 (32) で与えられる  $\{P_i\}$  を計算し、これを観測データと照合して、両者の間で計算される  $\chi^2$  値を小さくするような  $\{F_j\}$  を修正し、 $\chi^2$  値が最小になった  $\{F_j\}$  をもって、近似解と考える。前報では、 $\{F_j\}$  の 1 要素のみを取り出して修正する方法を示したが、計算効率を向上させる意味から本論文では、 $\{F_j\}$  ベクトルを全体的に修正する第 1 段階の計算を行い、ついで前報に示した方法を第 2 段階とする方法を採用した。本論文で採用した手順は次のとおりである。

①  $\{F_j\}$  に適当な初期値  $\{F_j^0\}$  を与える。 $\{F_j^0\}$  としては、何をとってもよいが、本論文のように、 $f_{\alpha_0}(\alpha)$  の分布として想定されるものがあれば、それを使用するのが効率

的である。

② 式 (32) を用いて  $\{P_i^0\}$  を計算する。上添字 0 は、初期値  $\{F_i^0\}$  を使用したことを示す。

③  $\chi^2$  値の区間成分  $\chi_i^2$  を次のように計算する。

$$\chi_i^2 = (Q_i - P_i^0)^2 / P_i^0 \dots \dots \dots (33)$$

④ 式 (33) で計算される各成分のうち、最大のものを与える区間  $i_{\max}$  を取り上げ、 $\{F_i^0\}$  を次のように修正する。

$$\{F_i^1\} = (1 - \beta_1) \{F_i^0\} + \frac{\beta_1}{K_s} \{K_{i_{\max}, j}\} \dots \dots \dots (34)$$

ここに、 $\{F_i^1\}$  は  $\{F_i^0\}$  に 1 回目の修正を行った結果であることを示し、 $\{K_{i_{\max}, j}\}$  は  $[K_{ij}]$  の  $i_{\max}$  列ベクトルで、 $K_s$  は、

$$K_s = \sum_j K_{i_{\max}, j}$$

である。 $\beta_1$  は次のように決定される定数である。

いま、式 (34) の修正を行ったとすると、修正後の  $\chi^2$  値、 $\chi^{*2}$  は

$$\chi^{*2} = \sum_i \frac{\left\{ Q_i - (1 - \beta_1) P_i^0 - \frac{\beta_1}{K_s} \sum_j K_{ij} K_{i_{\max}, j} \right\}^2}{(1 - \beta_1) P_i^0 + \frac{\beta_1}{K_s} \sum_j K_{ij} K_{i_{\max}, j}}$$

となる。そこで、

$$\partial(\chi^{*2}) / \partial \beta_1 = 0$$

すなわち、

$$\sum_i \left( \frac{1}{K_s} \sum_j K_{ij} K_{i_{\max}, j} - P_i^0 \right) \cdot \left[ 1 - \frac{Q_i^2}{\left\{ P_i^0 + \beta_1 \left( \frac{1}{K_s} \sum_j K_{ij} K_{i_{\max}, j} - P_i^0 \right) \right\}^2} \right] = 0$$

となるように  $\beta_1$  を決定する。

⑤ 式 (34) によって修正された  $\{F_i^1\}$  を手順①の  $\{F_i^0\}$  の代わりに代入して手順②の  $\{P_i\}$  を計算する。同様

に、手順③、④においても  $\{F_i^0\}$ 、 $\{F_i^1\}$ 、 $\beta_1$  の代わりに、それぞれ  $\{F_i^1\}$ 、 $\{F_i^2\}$ 、 $\beta_2$  とすることにより、 $\{F_i^2\}$  を求める。

⑥ 以下同様にして  $\chi^2$  値が改善されなくなるまで計算を反復する。

⑦ 以上の手順の後、 $\{F_i^j\}$  の 1 要素を修正する第 2 段階へ進む。

第 2 段階の手順は公表済みなので記述を省略する<sup>1)</sup>。

なお、本文に述べたように、アクセスに自転車を利用する乗客と歩行者とを区別して取り扱っている。

徒歩から自転車への転換率曲線を用いれば、 $g_{ia}(l|l_2$ ,

$l_e)$  を歩行者と自転車利用者とに分離できるので、 $[K_{ij}]$  も両者で別々に求めることができる。これをそれぞれ、 $[K_{ij}^w]$ 、 $[K_{ij}^b]$  と書くと、式 (32) は次のように改められる。

$$\begin{bmatrix} P_i^w \\ P_i^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ij}^w & 0 \\ 0 & K_{ij}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_i^w \\ F_i^b \end{bmatrix} \dots \dots \dots (35)$$

ここに、 $\{P_i^w\}$ 、 $\{P_i^b\}$  は、それぞれ歩行者および自転車利用者の到着時刻分布である。

本論文では、歩行者と自転車利用者を区別して観測し式 (35) を用いて  $\{F_i^j\}$  を推定したことを注記しておく。

参 考 文 献

- 1) 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. 337，1983.
- 2) 海津八三ほか編：心理学事典，p. 202，平凡社，1957.
- 3) 岩本千樹・太田勝敏：非集計モデルによる鉄道駅へのアクセス交通手段の分析，土木学会第 36 回年次講演会概要集，pp. 407～408，1981.
- 4) 服部四土主：自転車の科学，pp. 108～127，講談社，1982.
- 5) 角 知憲・村尾光弘・宮木康幸・松本嘉司：実質消費時間を用いる通勤駅勢圏の推定，土木学会論文集，No. 347 / IV-1，1984

(1983. 8. 29・受付)