

縦列収受方式を導入した料金所の処理能力に関する理論的研究*

Theoretical Study on the Capacity of Tandem Toll Booths

松井 寛**・藤田素弘***・長瀬正紀****

By Hiroshi Matsui, Motohiro Fujita and Masaki Nagase

1. はじめに

都市高速道路の料金所における渋滞対策の1つとして、縦列収受方式の導入が考えられている。縦列収受方式とは、料金所のツールアイランドを延長して、2つのブースを直列に配置することによって、同時に2台の車の料金収受を行う方式である。この方式では新たな用地拡張の必要がなく、また建設コストも比較的安価に済むことから、既設の料金所などの容量増強策として採用される例がみられる。

ところで、縦列収受方式の料金所の処理能力については、経験的にはある程度が判っているけれども、理論的に解明した研究例はきわめて少ない。Hallら(1983)¹⁾は縦列収受方式の処理能力を時空間座標を用いて解析し、これをゴールドゲート橋の料金所に適用した結果、単一収受方式に比べて15~25%の容量増加が見込めることを明らかにした。ただ縦列収受方式にも後述するように種々の運用方式があって、それによって処理能力も変わってくるが、この点については考慮されていない。

本研究では、待ち行列理論とシミュレーション手法を援用しながら、縦列収受方式による料金所の処理能力を理論的に解明することを目的としている。なお一般的に料金所の交通容量は料金支払い形態や車種構成によっても影響を受けるので、本研究では単一収受方式との対比によって縦列収受方式の交通容量を算定する方法をとることにしている。

2. 待ち合せ理論を用いた理論的考察

ここでは縦列収受方式を導入した料金所の処理能力について待ち合せ理論²⁾を用いて考察する。本研究では料金所の交通容量を求めることを目的としていることから、料金所前に途切れなく待ち行列が存在する飽和状態を想定する。先行車のサービス終了後、後続車がブース(窓口)まで到着するまでの移動時間と料金収受時間の合計をサービス時間と定義し、ここではランダムサービスを仮定する。また単一収受方式と縦列収受方式のサービス時間分布は同一と仮定する。以上の前提のもとで、単一収受方式と比べた縦列収受方式の交通容量を明らかにする。なお、単一収受方式と縦列収受方式では、料金収受時間はともかく移動時間は移動距離に差があるから当然異なってくると思われ、したがって両方式によるサービス時間分布を同一と仮定するにはやや無理がある。このようなサービス時間分布に差がある場合については3で取扱う。

さて、平均サービス率を μ とすると、微少時間 Δt 中に1台のサービスが終了する確率は $\mu \Delta t$ で与えられる。なお Δt 中に2台以上のサービスが終る確率は無視できるものとする。窓口の状態を、車がサービス中の状態を1、サービス済みの状態を2、窓口が空いている状態を0で表わし、後ブース、前ブースの順に2桁の数値で状態を表現する。ブース間に待ちスペースがある場合には、後ブース、待ちスペース、前ブースの順で同様に表現する。

(1) 待ちスペースのない場合³⁾

ブース間に待ちスペースがない場合は、システムの状態は10, 11, 21の3通りである。時刻 t から時刻 $t + \Delta t$ にかけてのシステムの状態の変化とその確率は表-1に示す通りである。

これより以下の状態方程式が成立する。

* キーワード: 縦列収受, 高速道路, 料金所
** フェロ-会員 工博 名古屋工業大学工学部教授
(〒466 名古屋市昭和区御器所町 Tel/Fax 052-735-5481)
*** 正 会 員 工博 名古屋工業大学都市循環システム工学専攻助教授
(〒466 名古屋市昭和区御器所町 Tel/Fax 052-735-5492)
**** 正 会 員 工修 名古屋市計画局技師
(〒460-08 名古屋市中区三の丸三丁目一番一号 Tel 052-972-2712)

$$\begin{aligned}
 P_{10}(t+\Delta t) &= (1-\mu\Delta t)P_{10}(t) \\
 &\quad +\mu\Delta tP_{11}(t) \\
 P_{11}(t+\Delta t) &= (1-2\mu\Delta t)P_{11}(t) \\
 &\quad +\mu\Delta tP_{10}(t)+\mu\Delta tP_{21}(t) \\
 P_{21}(t+\Delta t) &= (1-\mu\Delta t)P_{21}(t) \\
 &\quad +\mu\Delta tP_{11}(t)
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに $P_{ij}(t)$ ($i=1, 2, j=0, 1$) は時刻 t 以後ブースの状態が i 、前ブースの状態が j となる確率である。ここで定常状態を考えると

$$\begin{aligned}
 -\mu P_{10} + \mu P_{11} &= 0 \\
 -2\mu P_{11} + \mu P_{10} + \mu P_{21} &= 0 \\
 -\mu P_{21} + \mu P_{11} &= 0
 \end{aligned} \quad (2)$$

さらに

$$P_{10} + P_{11} + P_{21} = 1 \quad (3)$$

が成立するから、式 (2) と式 (3) の連立解として結局

$$P_{10} = P_{11} = P_{21} = 1/3 \quad (4)$$

が導ける。システム状態が 11 のときは 2 台がサービス中、10, 21 のときは 1 台がサービス中であることから任意の時点でサービスを受けている平均数は

$$1 \times P_{10} + 2 \times P_{11} + 1 \times P_{21} = 4/3 \quad (5)$$

となる。単一収受方式では常に 1 台がサービスを受けていると考えられるから、これと比べると、縦列収受方式の場合はその約 1.33 倍となる。

(2) ブース間に 1 台分の待ちスペースがある場合⁴⁾

ブース間に 1 台分の待ちスペースがある場合は、システムの状態としては 100, 101, 111, 121, 211, 221 の 6 通りが考えられ、さらに車の誘導方法として、待ちスペースでサービス待ちをさせない場合 (運用 1) と、前から順に詰めていき、待ちスペースでもサービス待ちをさせる場合 (運用 2) の 2 通りが考えられる。運用 1 の場合は 100, 101, 121, 221 の 4 通り、運用 2 の場合は前述の 6 通りすべてが考えられる。運用 1 の窓口の状態の変化とその確率を表-2 に示す。

時刻 $t + \Delta t$ における確率と時刻 t の各確率で表わした状態方程式は

表-1 システム状態の変化と確率

$t+\Delta t \backslash t$	1 0	1 1	2 1
1 0	$1-\mu\Delta t$	$\mu\Delta t$	
1 1	$\mu\Delta t$	$1-2\mu\Delta t$	$\mu\Delta t$
2 1		$\mu\Delta t$	$1-\mu\Delta t$

表-2 窓口状態の変化と確率
(待ちスペース 1 台：運用 1)

$t+\Delta t \backslash t$	1 0 0	1 0 1	1 2 1	2 2 1
1 0 0	$1-\mu\Delta t$	$\mu\Delta t$	$\mu\Delta t$	
1 0 1	$\mu\Delta t$	$1-2\mu\Delta t$		$\mu\Delta t$
1 2 1		$\mu\Delta t$	$1-2\mu\Delta t$	
2 2 1			$\mu\Delta t$	$1-\mu\Delta t$

$$\begin{aligned}
 P_{100}(t+\Delta t) &= (1-\mu\Delta t)P_{100}(t) \\
 &\quad +\mu\Delta tP_{101}(t)+\mu\Delta tP_{121}(t) \\
 P_{101}(t+\Delta t) &= (1-2\mu\Delta t)P_{101}(t) \\
 &\quad +\mu\Delta tP_{100}(t)+\mu\Delta tP_{221}(t) \\
 P_{121}(t+\Delta t) &= (1-2\mu\Delta t)P_{121}(t) \\
 &\quad +\mu\Delta tP_{101}(t) \\
 P_{221}(t+\Delta t) &= (1-\mu\Delta t)P_{221}(t) \\
 &\quad +\mu\Delta tP_{121}(t)
 \end{aligned} \quad (5)$$

となり、先と同様に定常状態における方程式の形を求めると

$$\begin{aligned}
 -P_{100} + P_{101} + P_{121} &= 0 \\
 -2P_{101} + P_{100} + P_{221} &= 0 \\
 -2P_{121} + P_{101} &= 0 \\
 -P_{221} + P_{121} &= 0
 \end{aligned} \quad (6)$$

として表わされる。各状態の定常確率の和は

$$P_{100} + P_{101} + P_{121} + P_{221} = 1 \quad (7)$$

であるから、結局

$$\begin{aligned}
 P_{100} &= 3/7, \quad P_{101} = 2/7, \\
 P_{121} &= P_{221} = 1/7,
 \end{aligned} \quad (8)$$

ここで 101, 121 の状態では 2 台のサービスが行われていることを考えると、平均サービス数は

$$\begin{aligned}
 1 \times P_{100} + 2 \times P_{101} + 2 \times P_{121} \\
 + 1 \times P_{221} &= 10/7
 \end{aligned} \quad (9)$$

となる。これより、交通容量は単一収受方式と比較して約 1.43 倍となる。

次に、運用 2 の場合の窓口の状態の変化とその確率を表-3 に示す。同様に時刻 t と $t + \Delta t$ 間での

状態方程式を求めると、

$$\left. \begin{aligned} P_{100}(t+\Delta t) &= (1-\mu\Delta t)P_{100}(t) \\ &\quad +\mu\Delta tP_{101}(t)+\mu\Delta tP_{121}(t) \\ P_{101}(t+\Delta t) &= (1-2\mu\Delta t)P_{101}(t) \\ &\quad +\mu\Delta tP_{111}(t) \\ P_{111}(t+\Delta t) &= (1-2\mu\Delta t)P_{111}(t) \\ &\quad +\mu\Delta tP_{100}(t)+\mu\Delta tP_{221}(t) \\ P_{121}(t+\Delta t) &= (1-2\mu\Delta t)P_{121}(t) \\ &\quad +\mu\Delta tP_{101}(t)+\mu\Delta tP_{211}(t) \\ P_{211}(t+\Delta t) &= (1-\mu\Delta t)P_{211}(t) \\ &\quad +\mu\Delta tP_{111}(t) \\ P_{221}(t+\Delta t) &= (1-\mu\Delta t)P_{221}(t) \\ &\quad +\mu\Delta tP_{121}(t) \end{aligned} \right\} (10)$$

となり、さらに定常状態においては

$$\left. \begin{aligned} -P_{100}+P_{101}+P_{121} &= 0 \\ -2P_{101}+P_{111} &= 0 \\ -2P_{111}+P_{100}+P_{221} &= 0 \\ -2P_{121}+P_{101}+P_{211} &= 0 \\ -P_{211}+P_{111} &= 0 \\ -P_{221}+P_{121} &= 0 \end{aligned} \right\} (11)$$

となる。同様に

$$P_{100}+P_{101}+P_{111}+P_{121}+P_{211}+P_{221}=1 \quad (12)$$

を考慮して、この連立方程式を解くと

$$\left. \begin{aligned} P_{100} &= 5/21, P_{101} = 2/21, \\ P_{111} &= P_{211} = 4/21, \\ P_{121} &= P_{221} = 3/21 \end{aligned} \right\} (13)$$

となる。ここで 101, 111, 121, において2台のサービスが行われるから、平均サービス数は

$$\left. \begin{aligned} 1 \times P_{100} + 2 \times P_{101} + 2 \times P_{111} \\ + 2 \times P_{121} + 1 \times P_{211} + 1 \times P_{221} &= 10/7 \end{aligned} \right\} (14)$$

となり、交通容量は単一収受方式と比べて約 1.43 倍となる。

結局ブース間に1台分の待ちスペースがある場合、運用1、運用2ともに同じ値となった。

(3) ブース間に2台分の待ちスペースがある場合

ブース間に2台分の待ちスペースがある場合（実際の料金所にはこのケースが多い）を考えると、システムの状態は1000, 1001, 1011, 1021, 1111, 1121, 1211, 1221, 2111, 2121, 2211, 2221の12通りが考えられる。さらに車の誘導方式にも幾通りかが考えられ、待ちスペースでサービス待ちをさ

表-3 窓口状態の変化と確率

(待ちスペース1台：運用2)

$\begin{matrix} t \\ t+\Delta t \end{matrix}$	100	101	111	121	211	221
100	$1-\mu\Delta t$	$\mu\Delta t$		$\mu\Delta t$		
101		$1-2\mu\Delta t$	$\mu\Delta t$			
111	$\mu\Delta t$		$1-2\mu\Delta t$			$\mu\Delta t$
121		$\mu\Delta t$		$1-2\mu\Delta t$	$\mu\Delta t$	
211			$\mu\Delta t$		$1-\mu\Delta t$	
221				$\mu\Delta t$		$1-\mu\Delta t$

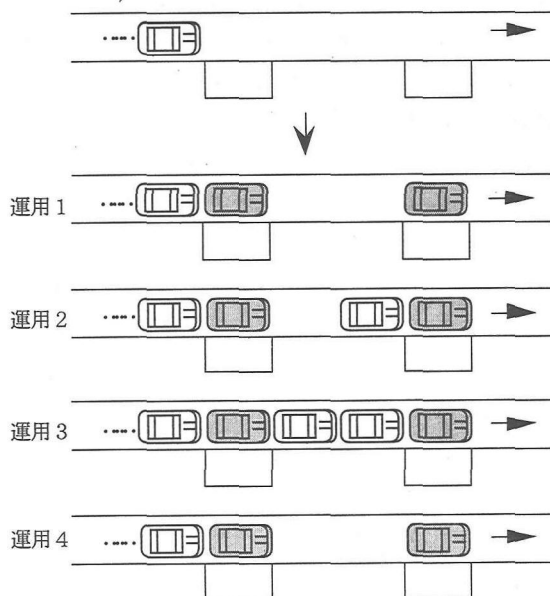


図-1 両ブースが空いた直後の状態
(待ちスペース2台分)

せない場合（運用1）、待ちスペースで1台サービス待ちを認める場合（運用2）、待ちスペースで2台のサービス待ちを認める場合（運用3）、1台おきに前後ブースに（奇数番目の車は前ブース、偶数番目の車は後ブースに）振り分ける場合（運用4）の4通りがある。

図-1に両ブースが空いた直後の状態を示す。両ブースが空くと運用1では、行列の1台目が前ブース、2台目が後ブースでサービスを受ける。運用2では、1台目が前ブースでサービスを受け、2台目が待ちスペースで待ち、3台目が後ブースでサービスを受ける。運用3では、1台目が前ブースでサービスを受け、2、3台目が待ちスペースに詰めて待

ち、4 台目が後ブースでサービスを受ける。図-1 において運用 4 が運用 1 と同じ形になるが、後ブースのサービスが前ブースより先に終わった場合など、ブース間でサービス待ちをする場合もでてくるので、この場合には運用 1 と異なってくる。

運用 1 は前ブースがサービス中であれば、次の車はブース間の待ちスペースが空いていたとしても後ブースでサービスを受け、サービスが終了した車以外は待ちスペースで待たせない誘導方式である。常に待ち行列が途切れない場合を考えると、1000,

1001, 1021, 1221, 2221 の 5 通りの窓口が発生する。この場合の時刻 t から $t + \Delta t$ にかけての窓口状態の変化とその確率を表-4 に示す。またその間の状態方程式は

$$\left. \begin{aligned} P_{1000}(t+\Delta t) &= (1-\mu\Delta t) P_{1000}(t) \\ &\quad + \mu\Delta t P_{1001}(t) + \mu\Delta t P_{1021}(t) \\ &\quad + \mu\Delta t P_{1221}(t) \\ P_{1001}(t+\Delta t) &= (1-2\mu\Delta t) P_{1001}(t) \\ &\quad + \mu\Delta t P_{1000}(t) + \mu\Delta t P_{2221}(t) \\ P_{1021}(t+\Delta t) &= (1-2\mu\Delta t) P_{1021}(t) \\ &\quad + \mu\Delta t P_{1001}(t) \\ P_{1221}(t+\Delta t) &= (1-2\mu\Delta t) P_{1221}(t) \\ &\quad + \mu\Delta t P_{1021}(t) \\ P_{2221}(t+\Delta t) &= (1-\mu\Delta t) P_{2221}(t) \\ &\quad + \mu\Delta t P_{1221}(t) \end{aligned} \right\} (15)$$

$$\left. \begin{aligned} -P_{1000} + P_{1001} + P_{1021} + P_{1221} &= 0 \\ -2P_{1001} + P_{1000} + P_{2221} &= 0 \\ -2P_{1021} + P_{1001} &= 0 \\ -2P_{1221} + P_{1021} &= 0 \\ -P_{2221} + P_{1221} &= 0 \end{aligned} \right\} (16)$$

となる。

$$P_{1000} + P_{1001} + P_{1021} + P_{1221} + P_{2221} = 1 \quad (17)$$

を考慮して、この連立方程式を解くと

$$\left. \begin{aligned} P_{1000} &= 7/15, P_{1001} = 4/15, \\ P_{1021} &= 2/15, \\ P_{1221} &= P_{2221} = 1/15 \end{aligned} \right\} (18)$$

を得る。ここで 1001, 1021, 1221, において 2 台、1000, 2221 では 1 台のサービスが行われていることを考えると、平均サービス数は

$$\left. \begin{aligned} 1 \times P_{1000} + 2 \times P_{1001} + 2 \times P_{1021} \\ + 2 \times P_{1221} + 1 \times P_{2221} &= 22/15 \end{aligned} \right\} (19)$$

表-4 窓口状態の変化と確率

(待ちスペース 2 台：運用 1)

$\begin{smallmatrix} t \\ t+\Delta t \end{smallmatrix}$	1000	1001	1021	1221	2221
1000	$1-\mu\Delta t$	$\mu\Delta t$	$\mu\Delta t$	$\mu\Delta t$	
1001	$\mu\Delta t$	$1-2\mu\Delta t$			$\mu\Delta t$
1021		$\mu\Delta t$	$1-2\mu\Delta t$		
1221			$\mu\Delta t$	$1-2\mu\Delta t$	
2221				$\mu\Delta t$	$1-\mu\Delta t$

となり、単一收受方式と比べた処理能力は約 1.47 倍となる。

次に運用 2 はブース間でのサービス待ちを 1 台に限定した誘導方式で、常に行列が途切れない場合の窓口の状態は 1000, 1001, 1011, 1021, 1121, 1211, 1221, 2121, 2211, 2221 の 10 通りである。以下紙面制約の関係で途中を省き、定常状態における確率を求めると

$$\left. \begin{aligned} P_{1000} &= 13/61, P_{1001} = P_{1011} \\ &= P_{1121} = P_{2121} = 8/61, \\ P_{1021} &= 2/61, \\ P_{1211} &= P_{2211} = 4/61 \\ P_{1221} &= P_{2221} = 3/61 \end{aligned} \right\} (20)$$

を得る。ここで 1001, 1011, 1021, 1121, 1211, 1221 において 2 台、それ以外では 1 台のサービスが行われることから、平均サービス数を求めると $94/16$ (約 1.54 倍) となる。

同様に、運用 3 は未サービスの車もサービス済みの車も関係なく、前から順に詰める誘導方式で、待ちスペースでは最大 2 台のサービス待ちが発生する。窓口の状態は 1000, 1001, 1011, 1021, 1111, 1121, 1211, 1221, 2111, 2121, 2211, 2221 の 12 通り考えられる。これまでと同様に定常確率を求めると、結局、

$$\left. \begin{aligned} P_{1000} &= 23/135, P_{1001} = P_{1011} \\ &= P_{1121} = P_{2121} = 8/135, \\ P_{1021} &= 6/135, \\ P_{1111} &= P_{2111} = 16/135 \\ P_{1211} &= P_{2211} = 12/135 \\ P_{1221} &= P_{2221} = 9/135 \end{aligned} \right\} (21)$$

を得る。ここで 1001, 1011, 1021, 1111, 1121, 1211, 1221 において 2 台、それ以外では 1 台のサ

ービスが行われることを考えると、平均サービス数は202/135（約1.50倍）となる。

最後に、運用4は1台おきに前後のブースに振り分ける誘導方式であり、行列の奇数番目の車が前ブースで、偶数番目の車を後ブースでサービスを受けることになる。窓口の状態は1000、1001、1121、2121の4通りである。

同様に定常確率を求めると

$$P_{1000} = P_{1001} = P_{1121} = P_{2121} = 1/4 \quad (22)$$

となる。ここで1001、1121で2台、1000、2121では1台のサービスが行われるから、結局平均サービス数は3/2（1.5倍）となった。

（4）まとめ

以上の結果を表-5に示す。これによってブース間の待ちスペースの有無や、車の誘導方法によって交通容量が変化することが明らかになった。

以上では指数型サービス時間分布を考えていたが、一定サービス時間と仮定した場合について触れておきたい。一定サービスの場合、定常状態においては待ちスペースのない場合のシステムの状態は11以外にはあり得ない。待ちスペースがある場合でも移動時間の違いを考えなければ、2台同時にサービス開始し、2台同時にサービスを終了するという繰り返しとなる。したがって容量は単一収受方式に比べて2倍となることがわかる。またサービス時間をアーラン分布と仮定した場合は、アーラン分布の性質から容量はランダムサービスの場合の値（表-5参照）と一定サービスの場合の値（2倍）の中間の値をとることがわかる。

表-5 待ち行列理論による結果

待ちスペース	誘導方法	単一収受との容量比
なし		1.33
1台分	運用1	1.43
	運用2	1.43
2台分	運用1	1.47
	運用2	1.54
	運用3	1.50
	運用4	1.50

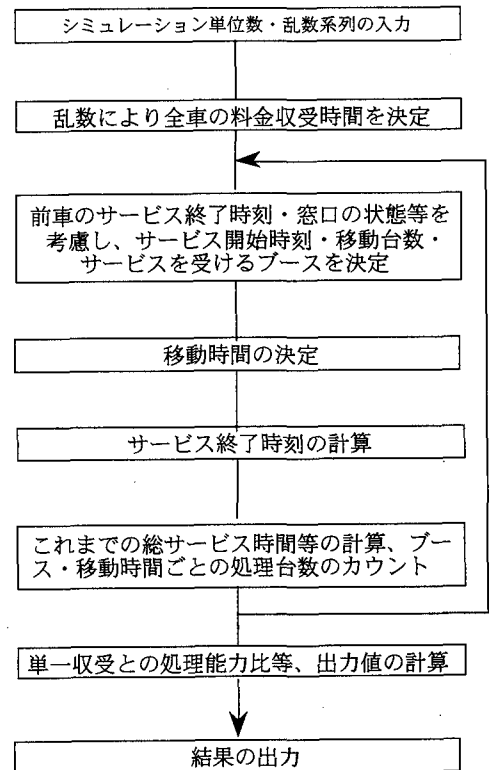


図-2 シミュレーションプログラムの流れ

3. シミュレーションによる解析

前章ではサービス時間が単一収受方式でも縦列収受方式でも同一であるとみなしてきた。しかし現実には縦列収受方式の場合はサービスを受けるブースまでの移動距離が平均的にみても長くなると考えられる。そこでここではサービス時間の違いに注目しながら、シミュレーションによって改めて縦列収受方式の容量解析を行う。なお実際に供用中の料金所では、ブース間に乗用車2台分相当の待ちスペースを設けていることが多いので、以下のシミュレーショ

ンでは2台分の待ちスペースのある場合に限定して実行することにする。図-2にシミュレーションプログラムの流れを示す。

先に述べた4通りの運用方式別にプログラムをN88-BASICで作成し、シミュレーション単位数は10000台とし、乱数系列を変えて2個ずつ実行する。

（1）サービス時間分布の観測結果⁵⁾

シミュレーションの実行にあたって必要となるサービス時間分布を、実際の料金所でのビデオ撮影に

よって観測した。観測場所は名古屋高速道路桶科金所で、観測は1995年10月30日（月）7：30～9：30と同年12月21日（木）8：00～9：00の2回行っている。なおサービス時間の計測は、サービスを受けるブースへの移動が可能となった時点から、料金収受が終了しブースを離れる瞬間までをサービス時間とし、車がブース前に停止するまでを移動時間、停止してから料金収受が終了し、ブースを離れるまでを料金収受時間として分け、それぞれビデオの再生画像からストップウォッチで1／100秒単位で計測している。

12月21日の観測から得られた計826台分の計測結果から、何台分のスペースを移動したかという移動台数別、前後ブース別に集計した移動時間、料金収受時間、サービス時間の各平均値を表－6に示す。

料金収受時間は移動台数による影響を受けないと考えられるから、ここでは全車が同一の分布に従うと考える。カイ2乗検定の結果、平均3.58秒の指数分布に最も適合した。一方移動時間分布については、移動台数別、前後ブース別に平均値に差はみられるものの、データのバラツキはそれほど大きくないため、シミュレーションにおいては、移動台数別、前後ブース別に表－6に示した平均移動時間をそのまま用いることとした。したがってサービス時間は指数分布で与えられる料金収受時間と、移動台数別、前後ブース別にとった一定値との合計値として計算されることになる。

ついでに観測結果から得られた車種別・料金収受形態別の単一収受方式における平均サービス時間を表－7に示す。

観測の結果はサービス時間は基本的に車種と料金収受形態によって異なることを示している。車種別の比較では、大型車は普通車に比べて平均で1秒長い。料金収受形態別では回数券が最も短く、ハイウェイカードが最も長い。一方現金払いはその中間である。ブース別にも多少のサービス時間に差がみられたが、これは係員の熟練度の差による偶然的なものと考えられる。ちなみに平成7年の名古屋高速道路公社の利用調査によれば、現金釣銭なしが15.1%、現金釣銭ありが36.7%、回数券が42.9%、ハイウェイカードが5.3%となっており、この比率を用いて平均的なサービス時間を求めると約6.9秒となり、

表－6 移動距離・ブース別平均サービス時間

移動台数	(秒)	前ブース	後ブース	計
1台分	平均移動時間	3.31	5.03	4.74
	平均収受時間	3.53	4.68	4.48
	平均総時間	6.85	9.71	9.22
2台分	平均移動時間	5.39	7.81	7.44
	平均収受時間	3.34	3.57	3.54
	平均総時間	8.73	11.37	10.98
3台分	平均移動時間	6.17	11.22	7.37
	平均収受時間	4.31	3.56	4.13
	平均総時間	10.48	14.79	11.50
4台分	平均移動時間	7.60	8.66	7.60
	平均収受時間	3.32	4.37	3.32
	平均総時間	10.91	13.03	10.92
全 体	平均移動時間	7.05	7.56	7.31
	平均収受時間	3.41	3.75	3.58
	平均総時間	10.44	11.26	10.86

表－7 車種別・料金収受形態別平均サービス時間
(単一収受方式) (秒)

収受方式	車 種		平 均
	普通車	大型車	
現金（釣銭なし）	6.9	10.6	7.1
現金（釣銭あり）	8.8	9.4	8.9
回数券	4.1	6.1	4.4
ハイウェイカード	11.9	12.7	12.0
全 平 均	7.2	8.2	7.3

表－8 移動時間分布を取り入れたシミュレーション結果

	運用1	運用2	運用3	運用4
平均サービス時間(秒)	10.74	9.74	9.51	10.29
5分間平均処理台数(台)	47.2	56.2	56.8	51.9
単一収受との処理能力比	1.15	1.37	1.38	1.26

これに基づいて単一収受方式のブースの処理能力を試算すると、およそ522台／時となる。

(2) シミュレーションの結果

シミュレーションの結果を表－8に示す。表中の値は、先の待ち合せ理論による理論解に比べてやや小さい値となっている。これは前述のとおり縦列収受の場合は単一収受の場合に比べてサービス時間が長くなることによって交通容量が低下するためであり、むしろこの結果は後述する実際の観測値に近い値となっている。また、シミュレーションでは移動時間を移動台数別、前後ブース別に一定としたが、これを分布型（アーラン分布）で与えても、シミュレーション結果には大きな差を生じなかった。一方運用方法による比較によれば、処理能力の高い順に

運用3、運用2、運用4、運用1となっている。運用3と運用1とでは2割近い差が生じている。これらより、運用方式によっても縦列収受方式の容量は影響され、ブース間でサービス待ちをさせる方式が容量を増加させる点で優れていることがわかった。

4. 観測による処理台数の計測

10月30日にビデオ撮影した観測結果に基づいて、縦列収受レーン（第5レーン）と単一収受レーン（第6レーン）の処理台数を比較する。なおこの日の縦列収受レーンでの車の誘導は運用2に近い形で行われていた。料金所前に行列が形成され始めた8:14から計測を始めて5分ごとに台数を記録し、行列が消滅する直前までの35分間の第5レーンと第6レーンの処理台数の比を表-9に示す。これによれば、縦列収受方式は単一収受方式に比べて平均約1.35倍の処理台数のあることが認められた。

同様に12月21日の観測結果に基づいた分析では、1.20倍となり、10月30日の結果と10%以上の差が付いている。この原因としては、12月21日の車の誘導方式は運用1に近い形で行われていたためと思われる、このように車の誘導方法によって縦列収受方式の処理能力にかなりの差が生じることが確認できた。

次に、表-10は10月30日の7:00~9:00の2時間に車両検知器によって計測された5分単位、10分単位、20分単位、30分単位、1時間単位の最大ピーク交通量を単一収受、縦列収受別に示したものである。なお全6レーンのうち第4、第5レーンが縦列収受方式、その他は単一収受方式である。表の最下欄には縦列収受と単一収受のそれぞれの最大交通量の比を計測単位ごとに示してあるが、1.31倍から1.36倍の値となっており、これは前述のシミュレーションの運用2の結果とほぼ同様の値となっている。

5. 結論

本研究で得られた結論は次のとおりである。

- 1) 収受方式にかかわらず同一のランダムサービス時間を仮定した待ち合せ理論に基づく解析結果

表-9 観測による5分間処理台数
(楠料金所; 95年10月30日)
[台]

	第5レーン (縦列)	第6レーン (単一)	比
8:14~8:19	54	42	1.29
8:19~8:24	60	45	1.33
8:24~8:29	56	40	1.40
8:29~8:34	55	48	1.15
8:34~8:39	49	38	1.29
8:39~8:44	61	41	1.49
8:44~8:49	55	35	1.57
全 体	390	289	1.35
平 均	55.7	41.3	1.35

表-10 ピーク最大処理交通量の比較
[台]

	5分間	10分間	20分間	30分間	1時間
単一収受	45	87	169	256	423
縦列収受	61	115	227	336	606
処理量比	1.36	1.32	1.34	1.31	1.34

- から、単一収受方式に比べて縦列収受方式の交通容量は、1.33~1.54倍の範囲の値をとることが証明できた。ただ実際のサービス時間は縦列収受方式の方が長くなると思われるので、上記の値はやや過大な値と考えられる。
- 2) サービス時間の違いを考慮したシミュレーション結果によれば、2台分の待ちスペースがある場合は、車の誘導方法によって、1.15~1.38倍の値をとることが明らかとなった。この値は実際の観測値とほぼ等しく、よってシミュレーションによって現実に近い状態が再現できることがわかった。
 - 3) 縦列収受方式を導入した料金所の交通容量は、ブース間の待ちスペースの有無、車の誘導方式によって変化することが理論的にも観測結果からも裏付けられた。効率性からいえば、2台分の待ちスペースがある場合（実際に多いケース）には、ブース間の待ちスペースでサービス待ちをさせるように車を順に先送りする運用方式が優れており、この場合には単一収受方式に比べて1.35倍程度の交通容量が期待できることがわかった。

最後に、本研究の遂行にあたり名古屋高速道路公社及び名古屋高速道路協会の方々に多大なご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Hall R. W. and Daganzo C. F. : Tandem Toll Booth for the Golden Gate Bridge. Transportation Research Record 905. pp7~14, 1983
- 2) 宮脇一男, 長岡崇雄, 毛利悦造: 待ち合わせ理論とその応用, 日刊工業新聞社, 1961
- 3) 長瀬正紀, 松井 寛, 藤田素弘: 縦列収受料金所の処理能力に関する研究, 第15回交通工学研究発表会論文報告集, pp101~104, 1995
- 4) 長瀬正紀: 縦列収受方式導入による料金所の交通容量に関する研究, 名古屋工業大学修士論文, 1997
- 5) 名古屋工業大学都市交通研究室: 名古屋高速道路における料金所処理能力に関する研究, 1996

縦列収受方式を導入した料金所の処理能力に関する理論的研究

松井 寛・藤田素弘・長瀬正紀

都市高速道路の料金所における処理能力増強策として、縦列収受方式の導入が考えられているが、縦列収受方式の処理能力については、過去ほとんど研究例がない。本研究は待ち合わせ理論とシミュレーション手法を用いて、縦列収受方式による料金所の処理能力を理論的に解明するとともに、観測結果との比較から理論の妥当性を検証した。結論として縦列収受方式が単一収受方式に比べておよそ15~38%処理能力が高いことが明らかになった。

Theoretical Study on the Capacity of Tandem Toll Booths

By Hiroshi Matsui, Motohiro Fujita and Masaki Nagase

Toll plazas on a urban expressway are generally constrained in width by building or other physical barriers. One method for increasing the capacity of a toll facility without increasing its width is to use tandem toll booths. In this paper we estimate the capacity of tandem toll booths by using Queuing Theory and Simulation Method. Theoretical results are also compared with field data. From this study we came to the conclusion that tandem toll booths were expected to increase capacity by about 15~38 percent compared with single toll booths.
