

# 駐車場におけるサービス均衡需要推計のための 駐車場パフォーマンス関数の研究

吉田 朗<sup>1</sup>・原田 昇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東北芸術工科大学 助教授 デザイン工学部 (〒990 山形市上桜田200)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京大学 助教授 工学部 (〒113 文京区本郷7-3-1)

本研究では、駐車場のサービス能力を評価するために、駐車待ち時間を目的変数とするパフォーマンス関数を提案する。このパフォーマンス関数は、従来の待ち行列モデルと比べて極めて簡潔であるが、駐車場容量を考慮した複数窓口のモデルであり、かつ駐車待ち発生過程を内生化した合理的なモデルである。実際、駐車場実態調査のデータにより、モデルのパラメータを推定した結果、その説明力は極めて良好であることを確認した。このモデルは、簡潔な構造ゆえに操作性は極めて高く、確率的利用者均衡を規範とする駐車場需要予測のフレームの中で、駐車場選択モデルとともに活用可能である。またこのモデルだけでも、駐車待ち時間を目標水準とする容量決定問題に適用できる。

**Key Words :** parking demand, parking performance, queueing model, parking place choice, stochastic user equilibrium, parking waiting time

## 1. はじめに

近年、駐車場整備の必要性が高まる中、多くの都市で都心部の駐車場計画が策定されている。しかし、駐車場の計画プロセスでは、駐車場の需要予測と施設規模の決定が、十分に合理的な方法で行われていないことが多い。そこでの問題は以下の点である。

第一に、駐車場のサービス能力を評価するための有効な指標が確立されていないことである。しばしば用いられるのは、駐車場の容量に対する総入庫台数の比、すなわち回転率である。これは駐車場経営の採算性を検討する上で有用であるが、駐車場の規模効果、駐車時間の影響を捨象しているため、駐車場のサービス能力を適切に評価し得るものではない。駐車場計画では想定される駐車需要に対して、どの程度のサービス水準（あるいは混雑状況）を目標とするかが曖昧なままに規模が決定されたり、代替案の評価が行われていることが多々ある。

第二に、駐車需要の予測では、混雑による需要変動が加味されていない。言い換えれば、駐車場のサービス能力と駐車需要の相互作用が考慮されていない。これまで駐車需要の分析に関して多くの研究が行われ、特に80年代からはVan Der Gootの研究<sup>2)</sup>を皮切りに、非

集計データを用いた離散選択モデルの適用事例がふえている(Youngら<sup>3)</sup>や室町ら<sup>4)</sup>のレビューに詳しい)。既往研究の多くは、駐車場の静的な属性(立地条件、駐車料金、利用上の制約など)と個人の社会経済属性によって駐車場の効用を計測し、利用者の選択行動を説明するものである。しかし、実際の駐車場は容量制約があるため、需要の集中が起これば駐車場が混雑し、それが利用者の選択行動を左右することは言うまでもない。容量制約を考慮しないモデルの予測結果は、単に需要発生地点の直近の駐車場に利用者が集中するということである。

一方、既往研究に目を向けると、駐車場のサービス能力の評価に関しては、毛利の先駆的研究がある<sup>5)</sup>。毛利は駐車場のサービス能力を待ち行列理論によって解析し、その有効性を示した。しかしこの研究では、待ち行列と駐車需要との相互作用を扱っていない。この相互作用を考慮した研究事例は少ないが、吉田・原田の確率的利用者均衡モデル<sup>6)</sup>、劉らの利用者均衡モデル<sup>7)</sup>、室町らの動的なマイクロシミュレーションモデル<sup>8)</sup>が提案されている。しかし、どの研究もフレームワークの構築に力点が置かれ、駐車場のサービス能力(駐車待ち時間)のモデルについて十分な検討がなされていない。

本研究の目的は、駐車場のサービス能力と駐車需要の相互作用を考慮した需要予測のために、駐車場のサービス能力を評価するモデル（駐車場パフォーマンス関数）を構築することである。以下、2.では駐車場のサービス能力を考慮した合理的な需要予測のフレームワークを提示し、3.ではそのための駐車場パフォーマンス関数の定式化を行う。4.では実際のデータからパラメータを推定し、その感度分析を行う。最後に5.では、本研究の成果をまとめ、今後の研究課題に言及する。

## 2. 駐車場需要予測のフレームワーク

### (1) 駐車場パフォーマンスの評価指標

現在、日本の多くの都市では、都心部における駐車場の慢性的な混雑が問題となっている。このような状況で、駐車場のサービス能力（パフォーマンス）を評価するための一つの指標は、一定規模の駐車場で需要に応じた発生する待ち行列の指標である。すなわち、

- 1)到着した時に待たされる確率（駐車待ち発生確率）
- 2)駐車場へ入るまでの待ち時間（駐車待ち時間）
- 3)駐車場の待ち台数（待ち行列の長さ）

が重要である。これらの指標は、利用者が駐車場を選択する際の評価要因となることは言うまでもない。特に、これまでの研究では、選択要因として「駐車待ち時間」の重要性が指摘されてきた<sup>6,8)</sup>。一方、交通計画上は、駐車場へのアプローチ道路を計画する際に、待ち行列による隣接道路への負荷が問題であり、「待ち行列の長さ」が重要な評価項目となる。ただし、「駐車待ち時間」と「待ち行列の長さ」は、待ち行列理論の上で明確な関係があるため（平均値の定理）<sup>11)</sup>、やはり「駐車待ち時間」が一義的な指標である。

以下、本研究では、駐車場パフォーマンスの指標として「駐車待ち時間」に着目するが、パフォーマンス関数を定式化する過程では、「駐車待ち発生確率」を明示的に扱うこととする。後述のように、本研究で提案する駐車場パフォーマンス関数は、駐車待ち発生確率モデルを含む2段階のモデルである。

### (2) 駐車場のサービス均衡モデル

すでに筆者らは、都市内駐車場において、混雑を加味した現実的な需要予測のためにサービス均衡モデルを提案した<sup>9)</sup>。そのモデルは、駐車場選択モデルと駐車場パフォーマンス関数を連動させ、両者の均衡解を得るものである。基本的な構造は以下のとおりである。

利用者 $n$ からみた駐車場 $i$ の効用 $U_{in}$ は、駐車場の立地や駐車料金など属性から決まる固定的な効用 $V_{in}$ と、上述のパフォーマンス指標（駐車待ち時間）のように容量と利用者数の関係から絶えず変動するサービスレベル

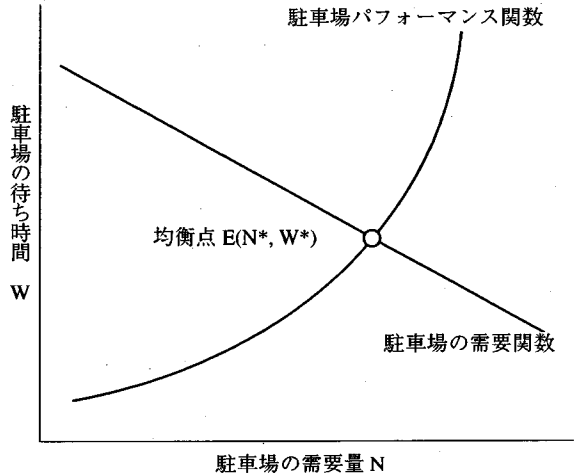


図-1 駐車場の需要量とパフォーマンスの均衡

$W_{in}$ の効用の和と仮定する。ここに $a$ は効用のパラメータ、 $u_{in}$ はランダム項である。

$$U_{in} = V_{in} - aW_{in} + u_{in} \quad (1)$$

利用者は利用可能な複数の駐車場の中から、最も効用の高いものを一つ選択すると仮定して、その確率を多項ロジットモデルで記述する。いま、利用者の総数を $M$ 人とすれば、駐車場 $i$ の利用者総数は次式となる。

$$N_i = \frac{M \exp(V_{in} - aW_{in})}{\sum_j \exp(V_{jn} - aW_{jn})} \quad (2)$$

一方、駐車待ち時間 $W_{in}$ は、混雑状況を表しているもので、駐車場容量が一定のもとで利用者総数に関して単調増加である。

$$W_i = g(N_i) \quad (3)$$

式(2)と(3)の関係を模式的に示すと図-1のようであり、駐車需要の実現値は、両者の調整作用による均衡点と捉えることができる。これは、利用者が駐車場の選択を変更しても、それ以上に高い効用を得ることができない状態を表している。実際には、利用者が駐車場の混雑状況を見ながら駐車場を選択し、結果的に均衡が図られる。

$$E[N_i^*, W_i^*]$$

すなわち、駐車場 $i$ の利用者総数は次式である。

$$N_i^* = \frac{M \exp\{V_{in} - ag(N_i^*)\}}{\sum_j \exp\{V_{jn} - ag(N_j^*)\}} \quad (4)$$

これは、市場均衡の一般的枠組みである需要・供給の均衡に対して、需要・サービスの均衡と呼ばれる。特に、上述のように利用者の選択行動が確率的とした場合には、確率的用户均衡（Stochastic User Equilibrium）と呼ばれる<sup>8)</sup>。さて、この均衡仮定を置く場合には、どの程

度の期間をとれば良いかが重要である。現実には、ピーク時に入庫待ちが発生し、それが一時的に激しくなる現象が起きる。これは均衡問題における発散のケースであり、ピーク時程度の短期間では均衡仮定が成立しないことを意味する。よって、ここでは1日の需給を対象とした均衡問題を考える<sup>9)</sup>。また、サービス均衡解を得るためには逐次平均法 (Method of Successive Average) などによる収束計算が必要である。

以下、本研究では、式(3)の駐車場パフォーマンス関数の具体化に焦点を当てる。

### 3. 駐車場パフォーマンス関数

#### (1) 基本モデル

駐車場の待ち行列に関する指標は、待ち行列の理論によって分析が可能である<sup>9)</sup>。待ち行列理論では、単位時間内の到着客数を $\lambda$  (到着率)、1つのサービス窓口の単位時間当たりのサービス可能量を $\mu$  (サービス率)として、 $C$ 個のサービス窓口がある場合に、トラフィック密度 $D$ が次のように定義される<sup>11)</sup>。

$$D = \frac{\lambda}{\mu C} \quad (5)$$

トラフィック密度 $D$ は、サービス窓口当たりの単位時間内の負荷率を表し、それが1を超えれば待ち行列は発散する。これは待ち行列を解析する上で最も基本的かつ重要な指標である。ところで、待ち行列の理論にしたがえば、到着時間の分布とサービス時間の分布にそれぞれ特定の関数形を仮定し、待ち発生確率の理論値を計算することができる。到着分布にポアソン分布、サービス時間分布に指数分布を仮定した複数窓口のモデルは、その代表的なものである (ケンドールの記号表示でM/M/Cモデル。ただしCは窓口数)。しかし、待ち行列モデルを駐車場に適用する場合、駐車場の1ロットが1サービス窓口であるため、駐車場の容量が大きくなるにつれ、計算が複雑になることは避けられない。また、モデル推計値の妥当性を判断するための実証分析はまれであり<sup>12)</sup>、実際の適用が限定的であったことは否めない。

一方、待ち行列シミュレーションモデルの適用も考えられる。シミュレーションモデルは到着分布やサービス時間分布の制約がなく、時間帯による到着台数の違いも考慮できることから、待ち行列のダイナミックな表現が可能である。特に、上述の平衡条件を満たさない過渡的な状況 (一時的なピーク) を分析できる点で優れている。シミュレーションモデルを駐車場の容量解析に適用した研究事例として、高山らの研究<sup>13)</sup>が報告されている。しかし、モンテカルロ・シミュレーションによって統計的に有意な結果を得るためには、大数法則にした

がって繰り返し計算が必要となる。少なくとも、サービス均衡需要を得るための収束計算のステップ毎に、このような反復計算を行うことは、効率的ではないと考えられる。

本研究では、待ち行列モデルの構造を踏襲し、一定期間内 (1日) における待ち時間平均値のモデルを定式化する。この際、駐車場を集計された単一サービス窓口として扱うことでモデルの単純化を図る。また、後述4.

(1) のように、実際の駐車待ち時間の散らばりは大きく、平均値だけの評価では不十分と考えられる。そのため、駐車待ち時間の平均値とともに標準偏差のモデルも作成し、この問題に対処する。

#### (2) 駐車待ち発生確率のモデル

駐車待ち発生を的確に説明する確率モデルを定式化する。いま、駐車場における観測時間 $I$ 内の到着台数を $A_i$  ( $I$ )台とすれば、到着率 $\lambda_i$  ( $I$ )は次式である。

$$\lambda_i(I) = A_i(I)/I \quad (6)$$

一方、駐車場のサービス時間 $1/\mu$  (あるサービスからつぎのサービスまでの経過時間) は、入出庫に要する時間と駐車時間からなるが、その大半は駐車時間 $T_i$ とみなすことにする。駐車場 $i$ の容量を $C_i$ 台とすれば、トラフィック密度 $D_i$ は次式である。

$$D_i = \frac{T_i A_i(I)}{C_i I} \quad (7)$$

さて、駐車待ちは、このトラフィック密度 $D_i$ が、ある閾値 $\phi$ を超えた時に生じると考えられる。閾値 $\phi$ は未知であるが、平衡条件より $D_i < 1$ であることから、 $\phi$ も1を超えることはない。トラフィック密度および閾値がランダム成分を含む確率変数であるとすれば、駐車待ちが発生する条件はつぎのとおりである。

$$D_i + u_i > \phi + v_i \quad (8)$$

この条件に対して、ランダム項に適切な分布を仮定すれば、駐車待ち発生確率が得られる。ここでは、ランダム項 $u_i, v_i$ について、平均が0で互いに独立で同一スケールのガンベル分布を仮定し、以下のロジスティックモデルを得る (model A)。

$$\begin{aligned} \Pr\{W_i > 0\} &= \text{Prob}\{D_i - \phi > v_i - u_i\} \\ &= [1 + \exp\{\omega(\phi - D_i)\}]^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 $\Pr\{W_i > 0\}$ : 駐車待ち発生確率

$\omega$ : ガンベル分布のスケールパラメータ

上式は、1つの駐車ロットの平均的な駐車待ち発生確率を示すものである。しかし、実際には駐車ロットが独立に利用されることはないので、駐車場の容量が大きければ、ロット間の代替性が働き駐車場全体のサービス能力が高まる、すなわち待ち発生確率は小さくなると考え

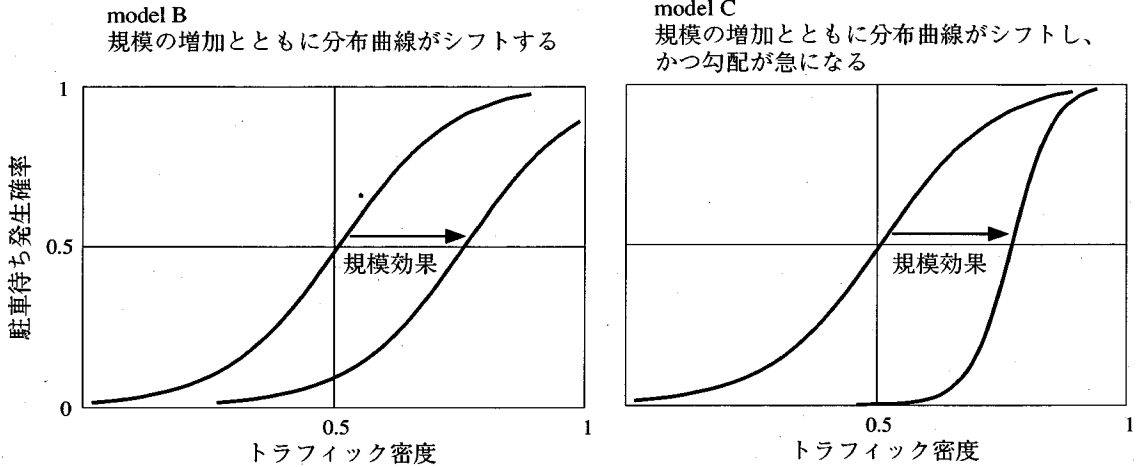


図-2 駐車場の規模効果の模式図

られる。このような駐車場容量の規模効果を明示する。いま、駐車場のトラフィック密度は、その中で最も空いているロットのトラフィック密度で代表されると仮定する。すなわち、

$$\bar{D}_i = \min_j D_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, C_i \quad (10)$$

である。ここに、 $D_{ij}$ はロット $j$ のトラフィック密度を表す。つぎに上式の期待値を求める。各駐車ロット $j$ のトラフィック密度 $D_{ij}$ も、LLD.ガンベル分布にしたがうとすれば、ガンベル分布の最大値に関する特性を用いて次式が得られる<sup>15)</sup>。ただし、全ロットのトラフィック密度は同一の平均値 $\bar{D}_i$ と分散スケール $\eta$ をもつと仮定する。

$$\begin{aligned} \bar{D}_i &= -E \left[ \max_j (-D_{ij}) \right] \\ &= -\frac{1}{\eta} \ln \sum_{j=1}^{C_i} \exp(-\eta D_{ij}) \\ &= -\frac{1}{\eta} \ln C_i + \bar{D}_i \end{aligned} \quad (11)$$

式(9)に式(11)を代入すれば、規模効果を考慮した駐車待ち発生確率のモデルは次式である (model B)。

$$\Pr \{W_i > 0\} = \left[ 1 + \exp \left\{ \omega \left( \phi - \bar{D}_i + \frac{1}{\eta} \ln C_i \right) \right\} \right]^{-1} \quad (12)$$

式(12)において、 $\phi + 1/\eta \ln C_i$ は容量に応じて変動する待ち発生閾値と解釈することもできる。これは容量に対して単調増加であるから、分布曲線を右側へシフトさせる効果を持つ (図-2のmodel B)。しかし、待ち行列理論のモデルが示唆するように、いかに大規模な駐車場であろうとも、トラフィック密度=1の状態では、待ち発生確率=1と考えるのが妥当である。式(13)はこのよう

な制約を持たない。そこで図-2のmodel Cのように、容量が大きくなれば確率分布の勾配がきつくなる (スケールパラメータ $\omega$ が大きくなる) という仮定を追加する。これは、容量による分散の不均一性を考慮することであり、スケールパラメータ $\omega$ の代わりに、容量について単調増加なスケール関数を導入する。ただし、具体的なスケール関数 $h(\cdot)$ の形式は、モデル推定を通じて特定する。

$$\omega_i = \alpha \cdot h(C_i) > 0 \quad (13)$$

さらに簡単のため、つぎのように未知パラメータを整理する。

$$\beta_1 = \alpha\phi, \quad \beta_2 = \alpha, \quad \beta_3 = \alpha/\eta$$

以上より規模効果を考慮した駐車待ち発生確率モデルは次式である (model C)。

$$\begin{aligned} \Pr \{W_i > 0\} \\ = \left[ 1 + \exp \left\{ h(C_i) \times (\beta_1 - \beta_2 \bar{D}_i + \beta_3 \ln C_i) \right\} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{ただし、} D_i = \frac{T_i}{C_i} \frac{A_i(I)}{I}$$

ここに、 $h(\cdot)$ : スケール関数、 $C_i$ : 駐車場の容量  
 $D_i$ : トラフィック密度、 $T_i$ : 平均駐車時間  
 $A_i(I)$ : 対象期間内の到着台数  
 $I$ : 対象期間

なお、このモデルでは、任意の駐車場 $i, k$ における推定パラメータについて次の関係が成り立つ。

$$\frac{\beta_1^k}{\beta_1} = \frac{\beta_2^k}{\beta_2} = \frac{\beta_3^k}{\beta_3} = \frac{h(C_k)}{h(C_i)}$$

式(14)の構造は、待ち行列モデルの基本的性質を踏襲している。すなわち、待ち発生確率は1ロット当たりの

平均到着台数の増加に応じて高くなるものの、一方で規模の効果が働き、1ロット当たりの平均到着台数が等しくても容量の大きな駐車場ほど待ち発生確率は低い。そしてサービス能力の限界付近（トラフィック密度 $\approx 1$ ）では、容量の大きな駐車場ほど待ち発生確率が急激に上昇する。

### (3) 駐車待ち時間のモデル

駐車場は複数窓口のサービスシステムであるが、それを「集計された単一のサービス窓口」とみなし、操作性の高い待ち時間モデルを得る。

待ち行列理論では、到着分布とサービス時間分布にどのような分布関数を仮定するかによって、いくつかの理論モデルが示されている。本研究では、そのひとつとして、到着分布が一般の確率分布、サービス時間分布が指数分布で与えられ、サービス窓口が1つのモデル（ケンドールの記号表示によりG/M/1）を基本とする。G/M/1モデルでは、待ち発生確率 $p$ を用いて、平均待ち時間がつぎのように導出される<sup>14)</sup>。

$$\begin{aligned} E\{W\} &= \sum_{k=0}^{\infty} E[\text{time in queue} \mid \text{an arrival finds } k \text{ in system}] \\ &\quad \times \Pr[\text{an arrival finds } k \text{ in system}] \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{k}{\mu} (1-p) p^k \\ &= \frac{1}{\mu} \frac{p}{1-p} \end{aligned} \quad (15)$$

この式(15)を基本に拡張モデルを定式化する。第一に、駐車場のサービス窓口数（容量）の影響に配慮する。式(15)の待ち発生確率 $p$ には、式(14)の駐車待ち発生確率モデルを適用し、サービス窓口数による待ち発生確率の違いを反映する。そして、駐車場のサービス率は、つぎのように容量 $C_i$ に比例して高まる（サービス時間は容量に反比例して減少）と仮定する。ただし $\delta$ は比例定数である。

$$\mu_i = \delta \frac{C_i}{T_i} \quad (16)$$

第二に、G/M/1モデルのもう一つの制約、サービス時間の指数分布を緩和することが必要である。なぜなら、駐車時間の分布は路上駐車のように短時間であれば指数分布に近づぐが<sup>12)</sup>、長時間駐車の場合は強い制約となる。ここでポアソン到着の待ち行列モデルを考える。サービス時間が指数分布のモデル（M/M/1）と一般分布のモデル（M/G/1）との関係は次式である（ポラチェック-ヒンチンの公式）。

$$W_{M/G/1} = \text{補正係数} \times W_{M/M/1} \quad (17)$$

ここに、 $W_{M/G/1}$  : M/G/1モデルの待ち時間

$W_{M/M/1}$  : M/M/1モデルの待ち時間

この関係は、複数窓口でも近似的に成立することが知られている<sup>11)</sup>。本研究では、式(17)との類似性からつぎの関係を仮定し、指数サービスの制約を緩和する。ただし $\gamma$ は正の補正係数である。

$$\begin{aligned} W_i &\equiv \gamma \times \frac{1}{\mu_i} \frac{p_i}{1-p_i} \\ &= \frac{\gamma}{\delta} \times \frac{T_i}{C_i} \frac{p_i}{1-p_i} \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)をさらにパラメトリックなモデルに展開して、駐車待ち時間の推定モデルを次式とする。

$$W_i = \theta_0 + \theta_1 \frac{T_i}{C_i} \left( \frac{p_i}{1-p_i} \right)^{\theta_2} + \varepsilon_i \quad (19)$$

ここに、 $W_i$  : 駐車待ち時間

$p_i$  : 駐車待ち発生確率（式(14)による）

$\theta$  : 未知パラメータベクトル、 $\varepsilon_i$  : 誤差項

### (4) 駐車待ち時間標準偏差のモデル

駐車待ち時間平均値と同様に、G/M/1モデルを基本として定式化する。G/M/1モデルについて、駐車待ち時間の分散を求めると次式が得られる。ここに、 $p$ は待ち発生確率である。

$$\begin{aligned} \text{Var}\{W\} &= E\{W^2\} - [E\{W\}]^2 \\ &= \frac{2p}{\mu^2(1-p)^2} - \frac{p^2}{\mu^2(1-p)^2} \\ &= \frac{2p-p^2}{\mu^2(1-p)^2} \end{aligned} \quad (20)$$

これに式(15)の平均値を考慮すると、待ち時間の標準偏差 $\sigma$ は平均値を用いて次式となる。式(21)では、待ち発生確率 $p$ が1に近づくと、待ち時間の標準偏差が平均値に漸近することがわかる。

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}\{W\}} = E\{W\} \sqrt{\frac{2-p}{1-p}} \quad (21)$$

駐車場 $i$ における待ち時間の標準偏差のモデルは、上の理論式に未知パラメータを導入した式(22)とする。

$$\sigma_i = \varphi_1 W_i \left( \frac{2-p_i}{1-p_i} \right)^{\varphi_2} \exp(u_i) \quad (22)$$

ここに、 $\sigma_i$  : 駐車待ち時間の標準偏差

$p_i$  : 駐車待ち発生確率（式(14)による）

$\varphi$  : 未知パラメータベクトル、 $u_i$  : 誤差項

以上に示した一連のモデルの推定は2段階で行う。まず、式(14)の駐車待ち発生確率モデルのパラメータを推定する。つぎに、この推定パラメータによって駐車待ち発生確率 $p_i$ を推計し、駐車待ち時間の平均値モデル（式(19)）と標準偏差モデル（式(22)）をそれぞれ推定する。

表-1 駐車場の属性と待ち発生状況等

駐車場#	駐車場容量 (台)	駐車場の 形式	入庫台数 (台/日)	回転率	駐車待ち 発生確率	平均待ち 時間(分)	待ち時間 標準偏差(分)	平均駐車 時間(分)
1	150	機械式	74	0.49	0.	0.	0.	105.2
2	120	広場	281	2.34	0.	0.	0.	112.1
3	75	広場	298	3.97	0.147	1.8	5.2	96.8
4	400	広場	865	2.16	0.	0.	0.	108.2
5	300	広場	714	2.38	0.	0.	0.	90.2
6	60	広場	278	4.63	0.465	6.1	9.5	92.9
7	46	広場	201	4.37	0.393	4.8	8.8	92.8
8	95	立体	303	3.19	0.250	2.3	5.2	100.3
9	650	立体	2605	4.01	0.246	1.9	4.7	96.9
10	39	広場	148	3.79	0.277	3.0	6.6	98.2
11	180	機械式	711	3.95	0.727	7.3	8.6	96.6
12	250	広場	340	1.36	0.	0.	0.	97.3
全駐車場	197	—	568	2.88	0.231	2.3	6.5	99.2

表-2 駐車待ち発生確率モデルの推定結果

	$\Pr \{W_i > 0\} = [1 + \exp(Z_i)]^{-1}$					
model A	$Z_i = 8.0531 - 10.550D_i - 2.2987d_i - 0.4214d_2$					$\bar{\rho}^2 = 0.418$
	(8.94)	(-7.52)	(-8.77)	(-2.05)		
model B	$Z_i = 8.6252 - 18.403D_i - 3.7618d_i - 2.8959d_2 + 1.1319\ln C_i$					$\bar{\rho}^2 = 0.443$
	(4.95)	(-4.84)	(-7.79)	(-4.18)	(4.32)	
model C	$Z_i = \sqrt{C_i} \times (8.6252 - 18.403D_i - 3.7618d_i - 2.8959d_2 + 1.1319\ln C_i)$					$\bar{\rho}^2 = 0.444$
	(4.96)	(-3.99)	(-6.03)	(-3.68)	(2.74)	
$D_i = \text{トラフィック密度} = \frac{T_i A_i}{600 C_i}$		$C_i = \text{駐車場容量(台)}$				
$T_i = \text{平均駐車時間(分)}$		$d_i = i \text{駐車場が Gondola 式の場合に} 1, \text{その他} 0$				
$A_i = \text{到着台数(台)}$		$d_2 = i \text{駐車場が立体自走式の場合に} 1, \text{その他} 0$				

#### 4. 駐車場パフォーマンス関数の推定

##### (1) 使用データ

宇都宮市都心部における駐車場の利用実態調査のデータを用いる。この調査は、宇都宮市都心部の主な時間貸し駐車場12ヶ所を対象として、1987年10月の休日に実施されたものであり、その内容は駐車場利用者に対するヒアリング調査と、駐車場の入出庫台数および待ち台数のカウント調査からなる。調査時間は、8時から18時までの10時間で、ヒアリング調査では、ランダムサンプリングにより総利用者の約15% (911サンプル) から有効回答を得ている。なお、調査日が休日ということで、駐車場利用者の95%は買物・私事目的であった。

表-1には、本研究で使用する主な調査データを掲げる。入庫台数はカウント調査より、駐車待ち発生状況と駐車時間はヒアリング調査よりそれぞれ得られたものである。駐車待ちの発生状況を調査時間(10時間)内で見ると、駐車待ち発生確率は全体で23.1%、駐車待ち時間は平均2.3分とわずかであるが、駐車場別には混雑の激しいところで駐車待ち時間7.3分、空いているところで0分と、稼働状況に応じてかなりの幅がある。また、どの駐車場でも待ち時間の標準偏差は、平均値を超えていることから、1日の散らばりは大きいと言える。これは、1日の駐車待ち発生を平均値で表すには限界があり、合わせて待ち時間の分散を示すことの必要性を示唆する。

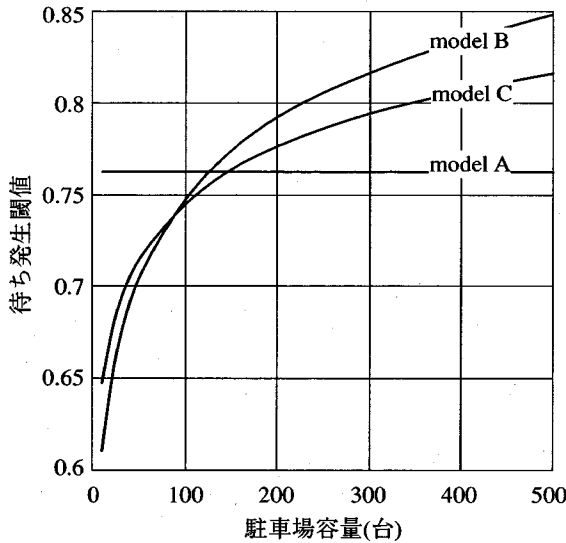


図-3 待ち発生閾値の推定値

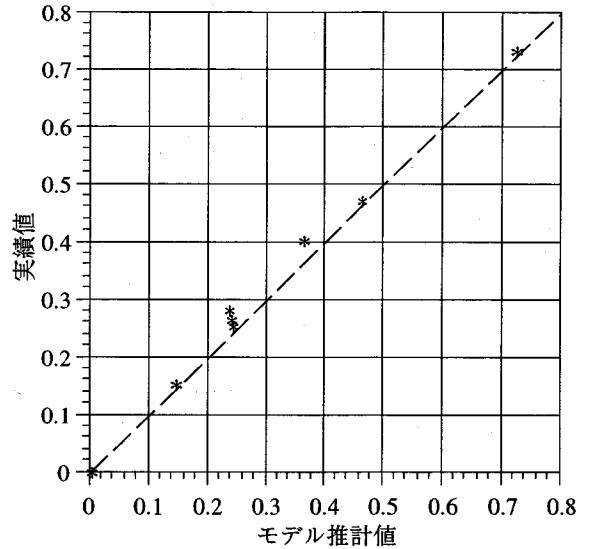


図-4 駐車待ち発生確率モデルの現況再現状況

## (2) 駐車待ち発生確率モデルの推定

駐車待ち発生確率モデルのパラメータは、調査時間内 (I=600分) に駐車待ちが発生したか否かという個人のサンプル (911サンプル) を使って、最尤法により推定する。ただし、駐車場の構造形式によってサービス能力が異なると考えられるため、ゴンドラ式および立体自走式のダミー変数を導入し駐車待ち発生閾値の違いに配慮する。

表-2にモデルの推定結果を示す。model Aは容量の影響を全く考慮しないモデル、model Bは容量による待ち発生閾値のシフトを考慮したモデルであり、それぞれ比較ケースとして掲げる。model Cは、本研究の提案モデル(15)式であり、容量による待ち発生閾値の違いと分散不均一性を明示したモデルである。なお、model Cのスケール関数 $h(x)$ の形式は、 $x^{-1}, x, x^{1/2}, x^2$ の4ケースについて検討し、最終的に尤度比が最大となる $x^{1/2}$ に特定した。

各モデルのパラメータは符号条件を満足し、 $t$ 値も信頼度99%以上で有意である。ゴンドラ式および立体自走式のダミー変数のパラメータは、ともに負値を示していることから、これらの駐車場では、広場式駐車場に比べて待ち発生閾値が小さく、駐車待ちが発生しやすいと判断できる。

まず、model Aとmodel Bを比較する。model Bでは規模効果のパラメータが統計的に有意であり、尤度比のみたモデルの精度は大幅に改善されることがわかる。model Bの有意性を検証するために、model Aとの尤度比について $\chi^2$ 検定を行ってみるとP-value0.1%で有意である。

$$-2(L_A - L_B) = 31.69 > \chi^2_{0.001}(1) = 10.83$$

これより、容量による待ち発生閾値の違いを考慮することの有効性が認められる。同様に、model Aとmodel Cの比較でもmodel Cの有意性が認められる。

$$-2(L_A - L_C) = 32.33 > \chi^2_{0.001}(1) = 10.83$$

つぎに、model Bとmodel Cを比較する。model Cの尤度比がわずかに高くなっているものの、モデルの精度に有意な差は見られない。残念ながら、今回の推定結果からモデルの優劣を判断することはできないが、model Cが構造的に望ましいことは3. (1) で述べたとおりである。

つぎに、model Cの特性を見るために、推定パラメータをつぎのように変形し、待ち発生閾値の特性を示す。

$$(\beta_1 + \beta_3 \ln C_i) / \beta_2$$

図-3は、3つのモデルの待ち発生閾値を比較したものである。model Aは待ち発生閾値が一定値をとり、規模効果を考慮したmodel B,Cは、待ち発生閾値が容量の増加とともに上昇する。本研究で提案するmodel Cは、待ち発生閾値がmodel A,Bの中位に位置することが読み取れる。

なお、図-4は、12箇所の駐車場の待ち発生確率 (集計値) について、実績値と推定値 (model C) をプロットしたものである。このモデルの説明力は極めて良好と言える。

## (3) 駐車待ち時間モデルの推定

駐車待ち時間モデルのパラメータは、12ヶ所の駐車場における調査時間 (600分) 内の平均待ち時間を被説明変数として、非線形最小2乗法により行う。ただし、被説明変数が駐車場毎の平均値であるため、誤差項 $\epsilon_i$ の不

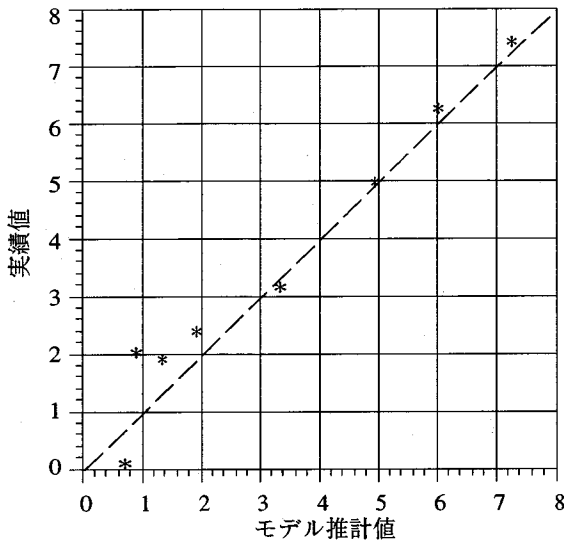


図-5 駐車待ち時間モデルの現況再現状況

均一分散 (Heteroscedasticity) を考慮して、サンプル数による重み付けを行う。

表-2のmodel Cにより、駐車待ち発生確率の推計値を計算した後、駐車待ち時間モデルのパラメータはつぎのように推定された。

$$W_i = 0.759 + 4.0268 \frac{T_i}{C_i} \left( \frac{\hat{p}_i}{1 - \hat{p}_i} \right)^{1.1446} \quad (23)$$

(2.66) (8.38) (10.35)

$$R^2 = 0.924$$

$$\text{ここに、} \hat{p}_i = [1 + \exp(\hat{Z}_i)]^{-1}$$

$W_i$  : 駐車待ち時間平均値(分)

$C_i$  : 駐車場の容量(台)

$T_i$  : 駐車時間(分)

$Z_i$  : model Cによる推計値 (表-2)

推定結果をみるとすべてのパラメータは論理的に妥当な符号を示し、定数項を除きt値も十分に大きい。第2項の係数パラメータは4.0268と得られているが、これは式(18)の仮定より、単一窓口のサービス時間を複数窓口のそれに線形変換する際の係数、かつ指数サービス分布を一般分布に補正するための係数と解釈される。また、指数パラメータは1.1446と1に近い値が得られ、式(15)のG/M/1モデルの特性をそのまま反映している。しかし、ここでの推定結果は少数サンプルによるものであり、パラメータの安定性を検討するために、さらなる事例分析が必要である。

図-5は、各駐車場の平均待ち時間について、実績値と推計値をプロットしたものであるが、このモデルの説明力は十分と言えよう。

なお、駐車待ち時間は、式(23)に駐車待ち発生確率モデルを代入することで、つぎのように変形できることを付記しておく。

$$W_i = 0.759 + 4.0268 \frac{T_i}{C_i} \exp(-1.1446 \hat{Z}_i) \quad (24)$$

#### (4) 駐車待ち時間標準偏差モデルの推定

式(22)の両辺を駐車待ち時間 $W_i$ で除し、被説明変数を変動係数とした後、対数線形化により最小二乗推定を行った結果、つぎのようなパラメータが得られた。ただし、サンプル数は7個(駐車待ちが発生した駐車場)である。

$$\ln(\sigma_i / W_i) = -0.1912 + 0.4884 \ln(2 / \hat{p}_i - \hat{p}_i) \quad (25)$$

(-3.48) (16.78)

$$R^2 = 0.982$$

$$\text{ここに、} \hat{p}_i = [1 + \exp(\hat{Z}_i)]^{-1}$$

$\sigma_i$  : 駐車待ち時間の標準偏差(分)

$W_i$  : 駐車待ち時間平均値(分)

$Z_i$  : model Cによる推計値 (表-2)

推定パラメータは妥当な符号を示し、十分なt値を有する。パラメータ $\phi_2$ (=0.4881)は待ち発生確率(2/p-p)に対する弾力性を示すが、式(21)のG/M/1モデル(=0.5)とはほぼ同等であることがわかる。ただし、駐車待ち時間モデルと同様、さらなる事例分析を通じてパラメータの安定性を検討する必要がある。

標準偏差は、駐車待ち発生確率 $p_i$ と駐車待ち時間平均値 $W_i$ の推計値から、つぎのように推計できる。

$$\hat{\sigma}_i = 0.8260 \hat{W}_i (2 / \hat{p}_i - \hat{p}_i)^{0.4881} \quad (26)$$

#### (5) 駐車場パフォーマンス関数の特性

##### a) 駐車場容量の影響

推定された駐車待ち発生確率モデル(表-2のmodel C)のシミュレーションにより、駐車待ち発生特性を分析する。ここでは、駐車場の容量の影響に着目する。図-6は、広場式駐車場について、駐車場のトラフィック密度と駐車待ち発生確率の関係を示したものであり、駐車場の容量に応じて6ケース(100~600台)試算している。この図から明らかなように、駐車待ち発生確率は、あるトラフィック密度を超えたところから急激に上昇した後、1に漸近する。また、それぞれのケースを比較すれば、同じトラフィック密度であっても、容量によって駐車待ちの発生傾向が異なることがわかる。

同様に、図-7には駐車待ち時間モデル(式(23))のシミュレーション結果を示す。基本的には、駐車待ち発生確率と同じ特性が読み取れるが、トラフィック密度 $\rightarrow$ 1



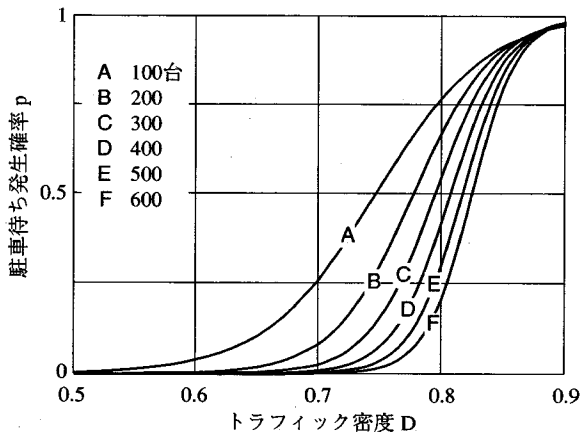


図-6 駐車容量が駐車待ち発生確率に与える影響

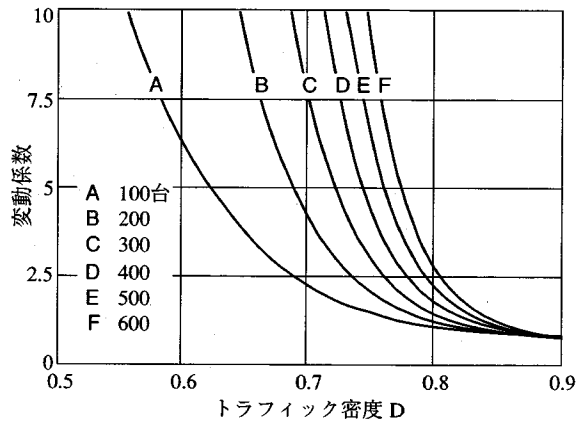


図-8 駐車容量が駐車待ち時間の変動係数に与える影響

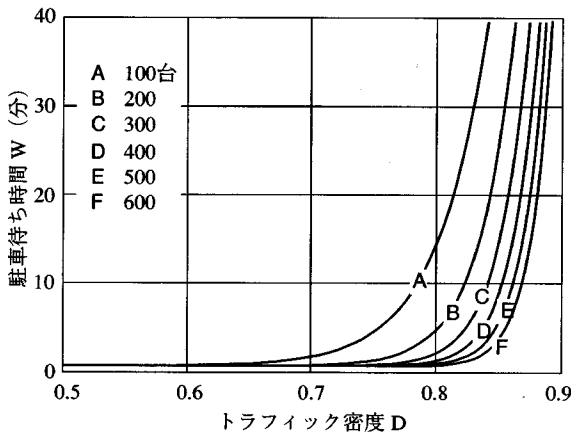


図-7 駐車容量が駐車待ち時間に与える影響

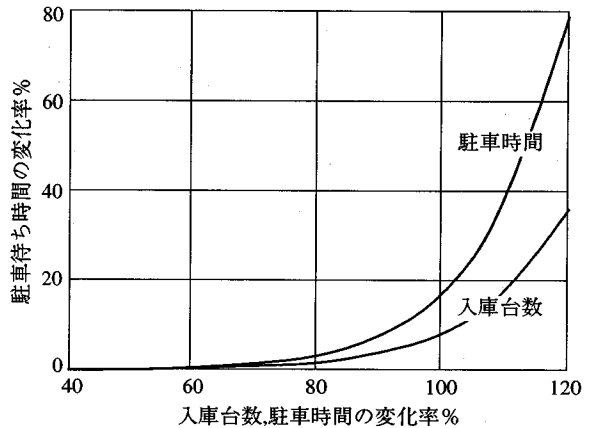


図-9 入庫台数と駐車時間が駐車待ち時間に与える影響

で駐車待ち時間は $\infty$ に発散する。

また、図-8には駐車待ち時間の変動係数の推計値(式(25))を示す。変動係数は、待ち発生確率や駐車待ち時間と同様に、容量が大きいほど急勾配の曲線を描き、トラフィック密度 $\rightarrow 1$ で0.826に収束する(なお、標準偏差そのものは、これに待ち時間平均値を乗じることで得られるが、その概形は図-7と同様である。

このように駐車待ち発生確率、および待ち時間平均値と標準偏差は、駐車場の容量に大きく左右される。これは、駐車場計画において、単に回転率だけを計画水準とする方法が不適切であり、容量に応じた検討が必要であることを示唆するものである。

#### b) 入庫台数と駐車時間の影響

駐車場の容量が一定とした場合に、トラフィック密度を左右する要因は、駐車時間 $T_i$ と入庫台数 $A_i$ である。これらの変化が駐車待ち発生確率 $p_i$ に与える影響は、式(14)より、 $\partial p_i / \partial A_i = \partial p_i / \partial T_i$ である。ここでは駐車待

ち時間に与える感度に着目する。一例として駐車容量100台、到着台数300台(期間60分)、駐車時間60分のケースを想定する。図-9は駐車時間、あるいは入庫台数の変化に対して駐車待ち時間がどのように変化するかを示したものである。両者の傾向は図-7のトラフィック密度と駐車待ち時間の関係に等しい。しかし、両者を比較すると、駐車時間の感度が、入庫台数のそれに比べ2倍ほど高いことがわかる。これは、駐車待ち時間モデル(式(23))の中に駐車時間が含まれるためである。

このように、トラフィック密度が等しい場合にも、駐車時間の違いにより、駐車場のパフォーマンスが大きく異なる。逆の見方をすれば、パフォーマンスを向上させるためには、入庫台数よりも駐車時間を抑制することが効果的と言えよう。しかし、駐車時間は利用者が任意に決定するものであり、計画者が直接コントロールすることは困難である。例えば、一定時間以上の駐車に対して料金格差を設けることが一つの方策と考えられる。

## (6) 駐車場パフォーマンス関数の適用

### a) サービス均衡需要の推計

駐車場パフォーマンス関数は、2.(2)で示したサービス均衡モデルの中で、駐車場選択モデルとともに活用することを目指している。パフォーマンス関数としては、式(24)の平均駐車時間のモデルを適用することができる。

さらに、式(26)の標準偏差モデルを加えれば、駐車待ち時間の変動(不確実性)を考慮した分析も可能である。この場合、式(3)のパフォーマンス関数 $g(\cdot)$ は、式(24)と式(26)の合成となる。ただし、 $b$ を危険回避度のパラメータとする。

$$g(N_i) = W_i + b\sigma_i \quad (27)$$

これより式(1)の効用関数はつぎのように修正される。

$$U_{in} = V_{in} - a(W_i + b\sigma_i) + u_{in} \quad (28)$$

### b) 道路負荷の検討

サービス均衡時の駐車待ち時間平均値 $W^*$ と標準偏差 $\sigma^*$ に対して、平均値の法則を使えば、危険側の駐車待ち台数 $L$ をつぎのように推計できる。ここで、 $\lambda$ は式(6)による到着率である。

$$L = \lambda(W^* + \sigma^*) \quad (29)$$

これより、隣接道路への負荷(容量低減)を分析することができる。また、アプローチ道路の必要延長や容量も検討できる。

### c) 駐車場の容量決定

駐車場パフォーマンス関数を、従来の待ち行列理論モデルと同様に単体で活用することも考えられる。式(23)の駐車待ち時間モデルにおいて、需要(到着率)と駐車時間が一定の場合、駐車待ち時間 $W$ は容量 $C$ のみの関数となる。この逆関数を使うと駐車待ち時間の望ましい水準(計画目標)に対して、容量を一意に決定することができる。駐車需要が一定の場合とは、駐車場が選択的に利用できない場合(専用駐車場しか利用できない場合)である。この例として、郊外ショッピングセンターの専用駐車場などが考えられる。

さらに発展的には、つぎのような総費用最小化問題を解いて容量 $C$ を決定することもできる。ここで、駐車待ち時間 $W$ は、需要(到着率)と駐車時間を与件とし、容量 $C$ のみの関数とする。費用関数は、第1項が容量 $C$ について単調増加、第2項が単調減少、全体として凹であるから、極小値が存在する。

$$\min_C \left[ (c_1 + c_2)C + c_3\lambda W \right] \quad (30)$$

- ここに、 $c_1$ : 1ロット当たりの建設費用  
 $c_2$ : 1ロット当たりの維持・管理費用  
 $c_3$ : 駐車待ち1台当たりの損失費用

## 5. おわりに

本研究では、駐車場のサービス能力と駐車需要の相互作用を考慮した需要予測を行うために、駐車場のサービス能力を評価するモデル(駐車場パフォーマンス関数)を提案した。このモデルは駐車待ち時間を目的変数とし、駐車待ち発生確率モデル、駐車待ち時間の平均値モデル、および標準偏差モデルから構成される。これらは、従来の待ち行列モデルと比べて極めて簡潔であるが、駐車場容量の違いを明示した複数窓口のモデルであり、かつ待ち行列理論の基本構造を踏襲した合理的なモデルである。駐車場実態調査のデータから、推定モデルの説明力は極めて良好であることも確認された。

また、推定モデルのシミュレーションにより、駐車場計画に際して留意すべき点を2点指摘した。第一に、駐車待ち発生確率、および待ち時間の平均値と分散は、駐車場の容量に大きく左右されるため、駐車場計画においては容量に応じた検討が必要であること。第二にトラフィック密度が等しい場合にも、駐車時間が駐車場のパフォーマンスに大きく影響することから、入庫台数よりも駐車時間のコントロールが重要であることを示した。

なお、4.(6)で示したパフォーマンス関数の適用については、今後、ケーススタディを通じて、その有効性を明らかにしていきたい。

## 参考文献

- 1) 長瀬恵一郎, 平石和利, 松本昌二: 中心商業地区における駐車需給モデルに関する一考察, 土木計画学研究・論文集, No.11, pp.89-96, 1993.
- 2) Van Der Goot, D.: A model to describe the choice of parking places, *Transpn. Res.-A*, Vol.16, No.2, pp.109-115, 1982.
- 3) Young, W., Thompson, R. and Taylor, M.: A review of urban car parking models, *Transpn. Reviews*, Vol.11, No.1, pp.63-84, 1991.
- 4) 室町泰徳, 原田昇, 太田勝敏: 情報案内を考慮した駐車場選択モデルに関する研究, 土木計画学研究・講演集, No.14, pp.139-146, 1991.
- 5) 毛利正光: 駐車場, 技術書院, 1971.
- 6) 吉田朗, 原田昇: 混雑度を考慮した駐車利用均衡モデルの研究, 都市計画論文集, No.24, pp.271-276, 1989.
- 7) 劉正凱, 河上省吾: 交通量均衡配分モデルによる駐車場選択・駐車場需要予測に関する研究, 都市計画論文集, No.28, pp.85-90, 1993.
- 8) 室町泰徳, 原田昇, 吉田朗: 駐車需要の時間変動を考慮した駐車場選択モデルに関する研究, 都市計画論文集, No.26, pp.289-294, 1991.
- 9) 太田勝敏: 交通システム計画, 技術書院, pp.59-71, 1988.

- 10) Seffi, Y.: *Urban Transportation Networks*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1985.
- 11) 森村英典, 大前義次: 応用待ち行列理論, 日科技連, 1975.
- 12) 堂柿栄輔, 佐藤馨一, 五十嵐日出夫: 都心部街路における駐停車待ち交通の特性とその対応策に関する研究, 土木学会論文集, No.458/IV-18, pp.55-63, 1993.
- 13) 高山純一, 武野雅至: 都市内大規模商業施設の駐車場容量決定法に関する研究, 都市計画論文集, No.28, pp.103-108, 1993.
- 14) Medhi, J.: *Stochastic Models in Queueing Theory*, Academic Press, San Diego, pp.309-335, 1991.
- 15) Ben-Akiva, M. and Lerman, S.R.: *Discrete Choice Analysis*, MIT Press, Cambridge, pp.105-106, 1985.

(1995. 6. 26 受付)

## A PARKING PERFORMANCE FUNCTION TO USE FOR ESTIMATING PARKING SERVICE EQUILIBRIUM DEMAND

Akira YOSHIDA and Noboru HARATA

This article presents a parking performance function which indicates a degree of parking congestion and evaluates the level of parking service. The function represents the relationship between parking waiting time and user density in a parking facility with constant capacity. The functional form of multi-server model which we propose is very simple and useful compared with the theoretical queueing model. But the function is certainly logical one, since it is formulated on the basis of the queueing theory and includes the probability of occurrence of waiting. The empirical study shows that the parking performance function is statistically significant. We propose that the function should be used with a parking choice model in the framework of stochastic user equilibrium for parking use.