

高速道路のサービス施設を対象とした 最適窓口数決定モデル

中日本高速道路株式会社 山本 浩司^{*1}
 株式会社パスコ 青木 一也^{*2}
 大阪大学大学院 貝戸 清之^{*3}
 京都大学経営管理大学院 小林 潔司^{*4}

By Kouji YAMAMOTO, Kazuya AOKI, Kiyoyuki KAITO
 and Kiyoshi KOBAYASHI

本研究は、高速道路のサービスエリア等に付随して設置される休憩施設内にあるお手洗い等のサービス施設における最適窓口数の決定問題に着目する。サービス施設への利用客の到着過程を混合ポワソン過程で表現するとともに、サービス施設の待ち行列発生過程をモンテカルロ・シミュレーションにより再現することにより、所与のサービス水準を満足するための最適窓口数を決定する方法論を提案する。サービス施設の窓口個々の使用時間に関するログデータを用いて、異質な特性を持つ利用客のサービス施設への到着率を閾値超過確率により表現する。サービス施設に待ち行列が発生している場合、使用時間に関するログデータから直接、利用客の到着率を観測することができない。そこで、実際に待ち行列が発生している連続時間の実データを用いて、モンテカルロ・シミュレーションを用いた最尤法により利用客の到着率を推計する方法を開発した。さらに、サービス施設毎に、所与のサービスレベルを達成するために必要な窓口数を決定するための方法論を開発した。最後に、本研究で提案した方法論を、東名高速道路のお手洗い休憩施設における最適窓口数の決定問題に適用し、方法論の有効性を実証的に検証した。

【キーワード】混合ポワソン待ち行列、最適窓口数、サービス施設、シミュレーション

1. はじめに

高速道路のサービスエリア（SA）やパーキングエリア（PA）等のサービス施設は、高速道路利用客の重要な交通空間としての重要性が再認識されており、その機能性のほか、快適性や利便性を考慮した新たな整備コンセプトによる施設のリニューアル計画が進められている¹⁾。たとえば、既設の休憩施設のお手洗い窓口数は、SA・PAの駐車ますの数等の要素をもとに、エリア別の特性に応じて設計された基準によ

って決定されている。しかしながら、施設を訪れる利用客の到着数は、施設個々によって異なる性質を持っており、利用客の到着が集中することによる施設の待ち行列の発生状況も、利用客の特性によって異なる。利用客に均等なサービスを提供するためには、施設毎の利用客の到着状況を正確に把握し、できるだけ利用客の待ち時間を少なくするような窓口を配置することが求められる。

サービス施設の利用客数は SA・PA の利用特性によって異なり、観光バス等の団体客の到着によって、

*1 東京支社清水工事事務所施設工事班 054-371-0582, k.yamamoto.aff[at]c-nexco.co.jp

*2 研究開発センター応用技術開発課 03-3715-4011, kiakzo6013[at]pasco.co.jp

*3 工学研究科フロンティア研究センター 06-6879-7598, kaito[at]ga.eng.osaka-u.ac.jp

*4 経営管理講座 075-383-3222, kkoba[at]psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

ある時間帯に利用客が集中する場合も少なくない。さらには、時間帯や利用客個々の1回の利用時間に、待ち行列の発生状況は影響を受ける。よって利用客の到着に関する現象を正確にモデル化するためには、利用客個々の施設の使用時間に関するログデータを記録することが必要となる。ログデータの記録方法はいくつか考えられるが、時間帯別の利用客の到着数と使用時間ならびに待ち行列の発生時間のすべてを同時に観測することは現実的には不可能であり、限られた情報をもとに、利用客の到着確率を推計するための方法を開発する必要がある。本研究では、お手洗い休憩施設のようなサービス窓口個々についての各利用客の利用開始時刻と終了時刻のみが記録されているデータをもとに、利用客の到着確率を推計する方法論を提案する。

高速道路のSA・PAのサービス施設の場合、到着する利用客は個人客、団体客等のように異質な特性を有しており、それらの利用客がサービス施設にランダムに到着する。さらに、利用客個々の施設の使用時間に関するログデータには、その客の特性（団体客、個人客の分け）は記録されない。本研究では、このように異質な利用客が混合してサービス施設に到着する現象を閾値超過確率として表現し、時間帯別の到着数を近似する方法を採用する。また、施設別の到着確率を用いてサービス窓口数（お手洗い便器数）を変化させ、待ち行列の発生状況に与える影響を分析するためのシミュレーションモデルを開発する。以下、2.では本研究の基本的な考え方を示す。3.では、利用客の到着確率の考え方について述べる。4.で、待ち行列が発生する場合の到着確率の推計方法について述べる。5.で、到着確率を用いてサービス施設におけるお手洗い便器数の最適窓口数を設定する手順を示す。6.では、本研究で提案した手法を用いた適用事例について考察する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 従来の研究概要

利用客がサービスを受ける際に発生する行列のような混雑状況の確率的な発生過程の数理モデルに関しては、これまで膨大な研究が蓄積されており、待ち行列理論が多くの成書としてまとめられている²⁾。

伝統的な待ち行列解析に関する研究では、利用客の到着分布とサービス時間分布を所与として、サービス施設の窓口数が、待ち時間や施設の稼働率に及ぼす影響を分析することに主眼が置かれていた。さらに待ち行列理論を用いて、待ち行列系の基本構造に関する確率過程をモデル化し、最適な窓口数、サービス価格、容量等の分析に関する研究³⁾⁻⁶⁾が発表されている。また、建築学の分野においては、駅舎トイレの器具数の算定に関する取り組みが報告されている⁷⁾⁻⁸⁾。一方、貝戸らは道路施設管理における障害物の発生過程を混合ポワソンモデルにより表現し、障害物発生リスクと巡回頻度の関係を明らかにした⁹⁾。

本研究で取り扱う事象は、高速道路のSA・PAのサービス施設を訪れる利用客の混雑状況のモデル化である。観測可能なデータが利用客個々の利用時間に関する情報のみであり、利用客の到着確率を直接的に推計することができない。また、異質な特性を有する利用客が混合して到着するような複雑な事象を取り扱うためには、伝統的な待ち行列理論を用いて解析的に最適窓口数を決定することは容易ではない。異質な客が混在する混合サービス系は、ある閾値を超過する事象がポワソン到着するような混合ポワソン過程としてモデル化できる¹⁰⁾。本研究では閾値超過確率を用いて、混合ポワソン過程における到着現象を解析する方法を提案する。

(2) 最適窓口数決定問題

本研究では、高速道路のサービス施設を対象とした最適窓口数決定問題について議論する。ここで、最適窓口数決定問題の諸条件として、1) 利用客の到着確率、2) 利用客の1回当たりのサービス利用時間を用いることとし、待ち行列の発生過程をシミュレーションによって再現し、待ち時間が発生する確率を計算する。サービス施設への利用客の到着確率は時間帯によって大きく異なる。本研究の適用事例で取り上げる高速道路のお手洗い休憩施設の場合 24 時間の利用が可能であり、利用客の到着確率と待ち行列の発生過程に関するシミュレーションは時間帯別に分析することが必要となる。このとき最適サービス数を決定する場合、到着確率が最大となる時間帯に、ある所与のサービス水準を満足するときの最小の窓口数を最適窓口数として定義する。

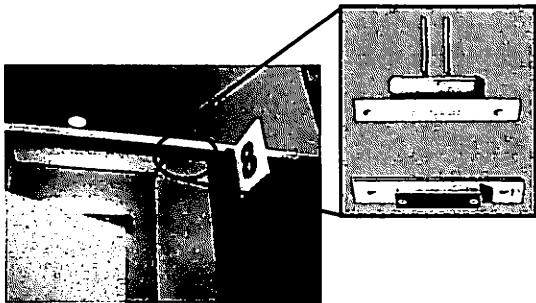


図-1 観測装置
(高速道路のお手洗い休憩施設の各ブースの扉に設置されたセンター)

なお、本研究における最適窓口数決定問題では、単純に待ち行列の発生状況（利用客の待ち時間の期待値）のみを用いてサービスレベルを設定し窓口数を決定する。このとき、窓口数に応じた施設の建設費用、維持管理費用、利用客の待ち時間発生による損失等を含めた経済分析に関する議論は取り上げない。

(3) 観測データの特性

サービス施設の最適窓口数を決定する場合には、現状の利用状況について観測したデータを用いて利用客の到着過程を推計する必要がある。高速道路のサービス施設の利用実態は、一日の時間帯や曜日、季節によって変動する。このような利用客の動きを常時観測し、混雑時における利用客個々の待ち時間を計測することは不可能である。

高速道路のお手洗い休憩施設には、図-1 に示すような利用客の利用状況を記録するための観測装置が設置されており、利用客が、1) お手洗い休憩施設に到着した時刻と、2) 利用を終了した時刻に関する情報のみが記録される。これらの情報から、ある時間帯に使用中であるお手洗い休憩施設の窓口数を推定することが可能である。窓口数が十分に多く確保され、待ち行列が発生しない状況下では、利用客がお手洗い休憩施設に到着すると同時に利用を開始するものとし、ある時刻においてお手洗い休憩施設が使用されている数をその時間帯における到着数とみなすことができる。

一方、団体客の到着等によりすべてのお手洗い休憩施設に利用客が到着しているときには、待ち行列が形成される。しかし、このときの観測データはす

べての施設が利用中であるという情報のみが記録され、待ち行列の発生状況に関する情報を獲得することができない。よって、待ち行列が発生している場合の利用客の到着数に関する情報を把握することができない。

観測データは時系列に蓄積されている。このため、すべてのお手洗い休憩施設が利用中である場合、その継続時間を集計することができる。つまり、待ち行列が発生してから解消されるまでの時間を観測データから得ることができる。本研究では、サービス施設の観測データから待ち行列が継続していた時間に関する情報をもとに、利用客の到着数を予測する方法を提案する。なお、本研究の適用事例で用いた利用客の利用状況を示す観測データは、基本的にはブースの空き状況に関する情報を利用客に提供するサービスのために観測されたデータである。本研究では、利用客の到着数を推計するために2次的に加工されたデータを利用しており、本研究を目的として新たに観測したものではないことを断つておく。

3. 到着確率

(1) 前提条件

カレンダー時刻 t_0 を始点とする連続的時間軸を考える。連続時間軸上の点を時点と呼ぶ。サービス施設は N 個の単位施設（窓口）で構成されており、各窓口は単一の利用客に対してのみサービスを提供する。すべての窓口に利用客が到着しているときには、待ち行列が形成される。いま、サービス施設に個人客と団体客のような異質な利用客が到着すると考える。利用客の特性によって、サービス系に到着する規模が異なる。さらには、サービスの使用時間に関するログデータからは、到着した客の特性を識別することができない。本研究では、このように異質な客層が混合するような混合ポワソン過程における到着確率を閾値超過確率により表現する。以下、本章では、利用客のサービス使用時間に関するログデータを用いて、待ち行列が発生しない場合における利用客の到着確率の推計方法について説明する。

(2) ポワソン到着確率

高速道路のサービス施設への利用客の到着過程は、

ランダムな現象の発生過程を表現する連続時間型の計数過程とみなすことができる。利用客の到着過程が異なる時間帯で互いに影響しないと仮定した場合、ポワソン到着過程で表現することができる。

初期時刻から無限に続く時間軸を考える。時間軸上の時間区間 $[0, t]$ ($t \geq 0$)において対象サービス施設 i ($i = 1, \dots, I$)に到着した利用客の累積数を状態変数 $n_i(t)$ により表す。利用客の到着過程は、到着する時刻にジャンプが発生する数え上げ過程 (counting process) $n(t)$ ($t \geq 0$)として記述できる。すなわち、利用客が到着する時刻を τ_k ($k = 1, 2, \dots$)と表せば、数え上げ過程は

$$n(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_{\tau_k \leq t} \quad (1)$$

と定義できる。ただし、 I_A は条件 A が成立する時に1、そうでない時に0となる指示関数であり、 $I_{\tau_k \leq t}$ は

$$I_{\tau_k \leq t} = \begin{cases} 1 & \tau_k \leq t \text{ が成立する時} \\ 0 & \text{そうでない時} \end{cases} \quad (2)$$

を意味する。この時、数え上げ過程は、利用客が到着する時刻においてジャンプする右連続な過程となる。さらに、数え上げ過程 $n(t)$ が、1) ほとんど確実に $n(0) = 0$ である、2) 独立な増分を有する、3) 任意の t に対して $n(t)$ がポワソン分布 $Po(\lambda t)$ に従う、という条件を満足する時、 $n(t)$ は同質ポワソン過程と呼ばれる。利用客の到着過程が同質ポワソン過程に従う時、任意の $0 < u < v < t$ に対して

$$\begin{aligned} P(n(v) - n(u) = n) &= P(n(v-u) = n) \\ &= \frac{\{\lambda(v-u)\}^n}{n!} \exp\{-\lambda(v-u)\} \end{aligned} \quad (3)$$

が成立する。ここに、 $n(v) - n(u)$ は期間 $[u, v]$ に到着した利用客数を表す。

(3) 閾値超過確率

高速道路のサービス施設への利用客の到着過程は、前述したように到着する利用客の規模が確率分布することにより、同質ポワソン過程で表現することができる。

できない。本研究では、異質な客層が混合してサービス施設へ到着する現象を、混合ポワソン過程として表現し、閾値到着確率の差分により人数別の到着確率を近似する。

サービス施設 i において、単位時間当たりに n_i 人以上の利用客が到着する事象の生起過程が、同質ポワソン過程に従う場合、

$$P_{N=n_i} = \lambda_i \exp(-\lambda_i) \quad (4)$$

により表すことができる。さらに、サービス施設 i に、単位時間当たり n_i が到着する確率 $p(n_i)$ は、式(4)を用いて、閾値超過確率の差分

$$p(n_i) = P_{N=n_i} - P_{N=n_i+1} \quad (5)$$

として近似することができる。サービス施設に待ち行列が発生しない時間帯の到着確率は、施設の利用履歴に関する観測データを用いて、式(4)及び式(5)により直接推計することができる。

4. 待ち行列が発生する場合の到着確率

(1) 到着確率の考え方

サービス施設に待ち行列が形成されている時間帯の観測データは、全施設が使用中であるという情報のみが記録され、そこから到着人数を直接把握することができない。しかし、全サービス施設が使用されることで待ち行列が形成されている連続時間の記録が残されている。この待ち行列発生時間の履歴情報をもとに、待ち行列が発生している時間帯の利用客の到着確率を予測するための方法を提案する。

待ち行列が発生しない時間帯の到着確率を $p(n_i)$ と表現する。この $p(n_i)$ をベンチマークケースとし、このベンチマークケースと待ち行列が発生している時間帯の到着人数の乖離を補正係数 β で表現する。つまり、待ち行列が発生している時間帯では、ベンチマークケース時と同様の確率で、 $n_i \cdot \beta$ 人が到着するものと仮定する。このとき、

$$q(n_i \cdot \beta) = p(n_i) \quad (6)$$

が成立する。

(2) 推計方法

待ち行列が発生する時間帯における利用客の到着過程を式(6)により表現するためには、観測データを用いて補正係数 β を推計する必要がある。本研究では、利用客の到着確率を閾値超過確率の差分により定義していることから、補正係数 β を解析的に算出することが困難である。そこで、補正係数 β を変動させ、複数の利用客の到着規模を想定したシミュレーションを実行し、そのときに形成される待ち行列の連続発生時間をもとにした最尤推定法により補正係数 β を推計する方法を提案する。

いまベンチマークケースからの乖離度を補正係数 β とした場合のサービス施設において、連続して t 分の待ち行列が形成される確率を $n(t, \beta)$ とする。また、サービス施設の利用状況に関する K 個の観測データが獲得できたものとする。この観測データは、各時刻におけるサービス施設の待ち行列の発生状況を示し、

$$\tau^k = \begin{cases} t & \text{待ち行列が連続 } t \text{ 分発生している時} \\ 0 & \text{待ち行列が発生していない時} \end{cases} \quad (7)$$

と定義する。添字 k は観測データのサンプル番号を示している。このとき、 K 個の観測データが生じる同時生起確率を表す対数尤度関数は、

$$\begin{aligned} \ln\{\mathcal{L}(\beta)\} &= \ln \prod_{t=0}^T \prod_{k=1}^K \{n(t, \beta)\}^{\delta^k} \\ &= \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \delta^k \ln\{n(t, \beta)\} \end{aligned} \quad (8)$$

と定義することができる。ただし、 T は連続待ち時間の最大値を表し、また、 δ^k はダミー変数であり、

$$\delta^k = \begin{cases} 1 & \tau^k = t \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (9)$$

と定義する。補正係数 β は、対数尤度関数(8)を最大にするようなパラメータとして求めることができる。

確率 $n(t, \beta)$ は、数値シミュレーションによって算出する。モンテカルロ・シミュレーションにより到着

過程として起こり得る 1 つの確定的な現象を発生させ、複数回の試行による無数のサンプル集合を算出する。モンテカルロ・シミュレーションによる確率 $n(t, \beta)$ の算出手順を以下に記述する。

STEP-1 補正係数 β の値を任意に設定する。分析対象のサービス施設の窓口数を M とする。

STEP-2 シミュレーションの試行番号を $s = 1$ に設定する。初期時刻 $u = 1$, $z = 0$ とする。 z は、サービス施設を利用中の利用客数を示す。また、到着確率を算出する対象時間の最大値を U 、シミュレーションの目標回数を S と設定する。

STEP-3 亂数 $x(0 \leq x \leq 1)$ を発生させる。次の式、 $v = \arg \max \{\bar{v} : \sum_{n_i=0}^{\bar{v}} q(n_i \cdot \beta) \leq x\}$ を満足する整数 v を、その時刻における到着人数として記憶する。ここに、 \arg は、上式の右辺を最大にする \bar{v} を指定する記号である。さらに、 $z = z + v$ とし、サービス施設を利用中の人数 z を更新する。

STEP-4 現在の利用客を $j(j = 0, \dots, z)$ とし、利用客個々のサービス開始と終了時刻を記録する。利用客 j のサービス開始時刻を w_{in}^j 、サービス施設利用時間を s^j とするとき、現在時刻 u に関して、 $u \geq w_{in}^j + s^j$ が成立すれば、利用客 j のサービス施設利用が終了する。終了人数の合計を r とし、 $z = z - r$ によりサービス施設を利用中の人数 z を更新する。このとき、 $M < z$ が成立すれば、当該時刻において待ち行列が発生していることを示す。連続して t 分以上の待ち行列が発生した回数の累積を、 $\omega(t)$ として記録する。

STEP-5 u が目標期間 U に到達しており、シミュレーション回数 s が目標数 S に到達していればアルゴリズムを終了する。 u が目標期間 U に到達しているが、シミュレーション回数が目標に到達していないければ、 $s = s + 1$, $u = 1$ として、**STEP-2** へ戻る。それ以外は、 $u = u + 1$ として、**STEP-3** へ戻る。

以上の手順により、利用客の到着と待ち行列の発生状況に関するサンプル集合を獲得することができる。最終的に、確率 $n(t, \beta)$ は、

$$n(t, \beta) = \frac{\omega(t)}{S \cdot U} \quad (10)$$

により算出する。

以上の STEP を通じて確率 $n(t, \beta)$ を求めれば、対数尤度関数(8)を最大にするような β の値を 1 次元探索法により求めることができる。

5. 最適窓口数の決定方法

(1) 最適窓口数とサービス水準

施設の窓口数と利用客の待ち時間の間にはトレードオフの関係が存在する。窓口数を多く設定すれば、待ち時間は少なくなる。本研究では、サービス水準として、待ち行列を形成する利用客の最大待ち時間用いて定義する。つまり、ある施設に対して目標とするサービス水準を許容できる最大待ち時間により設定し、そのサービス水準を満足するときの最少の窓口数を当該施設の最適窓口数として設定する。待ち行列の発生過程は、モンテカルロ・シミュレーションによって再現するため、シミュレーションの試行回数に対してサービス水準を満足した頻度を確率で表現することが可能である。なお、ここで用いるシミュレーションモデルは、4.(2)にて説明したものと同様のモデルを用いることができる。

当然のことながら、本研究で用いる最適窓口数は、サービス水準を与件とした条件付最適解であり、サービス水準の設定方法も含めてサービス施設全体の最適化に関しては多くの課題を残していることは言うまでもない。

(2) 分析手順

最適窓口数を設定するまでの分析手順を、図-2 のフローに示す。分析対象の施設における使用時間のログデータの収集から最終的な最適窓口数の設定までは、3つのフェーズに分類される。

Phase-1 では、利用客個々の施設使用開始時刻と終了時刻が記録されたログデータをインプット情報として、時間帯（24 時間）別の待ち行列の発生状況を調査する。待ち行列が発生しない時間帯ではログデータから利用客の到着確率を推計する。一方、待ち行列が発生する時間帯については、実際に待ち時間

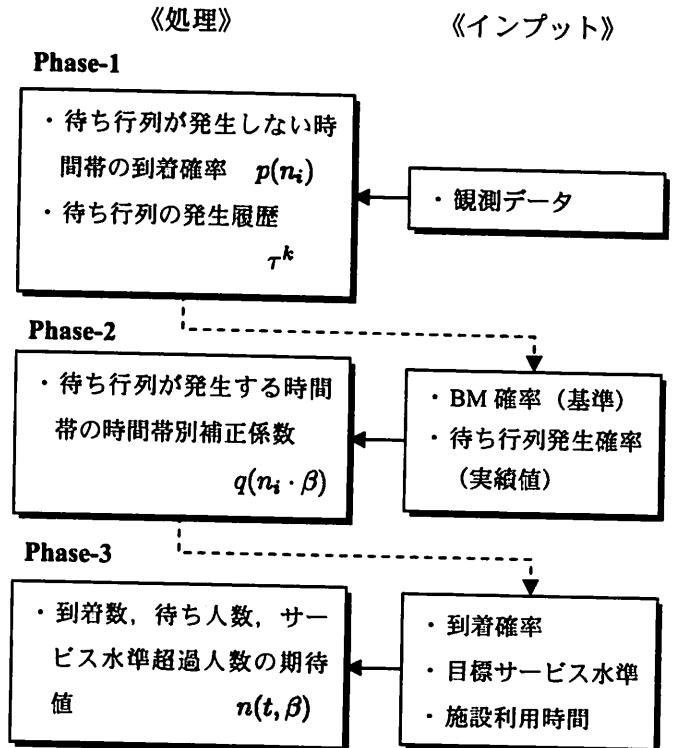


図-2 分析手順

が発生した際の連続待ち時間の発生頻度の実績値を集計する。

Phase-2 では、待ち時間が発生する時間帯における補正係数を最尤推定法により算出する。まず、**Phase-1** にて求めた待ち時間が発生しない時間帯における到着確率をベンチマークケースとして設定し、さらには連続待ち時間の発生頻度をインプット条件として設定し、待ち時間が発生する時間帯別の利用客の到着率に関する補正係数を算出する。

最後に **Phase-3** では、時間帯別に推計した到着確率と利用客 1 人当たり 1 回の使用時間、さらには目標とするサービス水準（許容最大待ち時間）を条件として付与し、時間帯別の待ち行列の発生過程をシミュレーションによって再現する。モンテカルロ・シミュレーションによって複数回のサンプルを発生させ、時間帯別の、1) 利用客の到着数、2) 待ち人数、3) サービス水準（時間）を超えて待ち行列を形成する人数についての期待値の推移を導出する。さらにサービス水準（時間）を超えるサンプル数をカウントする。利用客 1 人当たり 1 回の使用時間は、実績値から計算した平均と分散に従う正規分布に従うと仮定し、到着した利用客毎の利用時間を正規分布からの乱数を発生させて求める。

表-1 分析の条件

利用時間	女性	平均120秒、標準偏差20秒の正規分布
	男性（大便器）	平均240秒、標準偏差20秒の正規分布
	男性（小便器）	平均60秒、標準偏差10秒の正規分布
許容待ち時間		2分
シミュレーション 試行回数		1,000回
推計単位		1分
推計範囲		24時間

6. 適用事例

(1) 適用事例の概要

本研究で提案した最適窓口数決定モデルを、中日本高速道路株式会社東京支社でリニューアルが計画されている東名高速道路の6箇所のSA・PAのお手洗い休憩施設に適用した。これらの各施設に関する平成19年8月から平成21年4月までに観測されたログデータを用いて、施設毎の到着率を推計し、現行の窓口数における待ち時間を予測した。さらに、窓口数を変化させた場合の待ち行例発生過程のシミュレーションを実行し、所与のサービス水準を満足する時の最適窓口数を施設毎に算出した。本研究では、お手洗い休憩施設を必要とする客は、その必要性が発生した場合に最寄りの施設を利用すると考え、客の施設利用行動は独立であると考えた。サービス水準として設定した許容待ち時間は、平成19年度に実施したヒアリング調査の結果から、女性、男性ともに、不満を指摘する客が増加しあらじめる限度として2分と設定した。また、利用客1人の1回当たりに要する施設の利用時間は、ログデータを集計し、表-1に示すように男女別に設定した。また、同表には、待ち時間を予測するためのシミュレーションの算定条件を併記している。

(2) 到着率及び待ち時間の予測

まず、観測データから待ち行列が発生しない時間帯の到着確率を算出した(Phase-1)。図-3に、港北PA・下り・女性の時間帯別の到着人数と到着確率の関係を示している。深夜1時から7時及び21時から

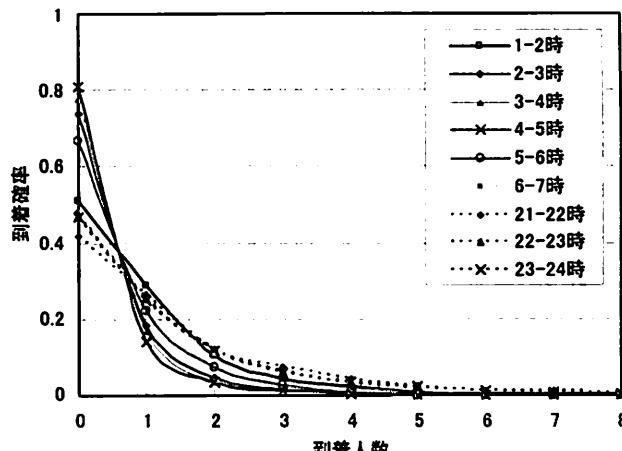


図-3 待ち行列が発生しない時間帯の到着確率
(港北 PA・下り・女性)

表-2 補正係数の算出結果 (港北 PA・下り・女性)

時間帯	補正係数
0 - 1時	1.5
7 - 8時	2.4
8 - 9時	3.3
9 - 10時	7.4
10 - 11時	8.6
11 - 12時	8.6
12 - 13時	7.4
13 - 14時	2.3
14 - 15時	2.1
15 - 16時	1.8
16 - 17時	2.1
17 - 18時	4.3
18 - 19時	2.9
19 - 20時	2.1
20 - 21時	1.5

24時までの時間帯では待ち行列が発生しておらず、利用客の到着確率を、ポワソン過程を用いた閾値超過確率の差分により算出することができる。

一方、待ち行列が発生している時間帯の到着確率を求めるために、待ち行列が発生していない時間帯の到着確率を基準とした補正係数を算出した(Phase-2)。最尤法により補正係数を算出するためのモンテカルロ・シミュレーションの試行回数を時間帯別に各1,000回、補正係数の探索範囲を1.0から10.0まで0.1刻みに設定し、尤度関数(8)が最大となる補正係数を求めた。待ち行列が発生しない時間帯である深夜1-2時の到着確率を補正係数算出の基準の確率として設定した。表-2に、待ち行列が発生している時間帯における到着確率の補正係数の算出結果を示す。当施設では、9時から13時に利用客の到着が集中して

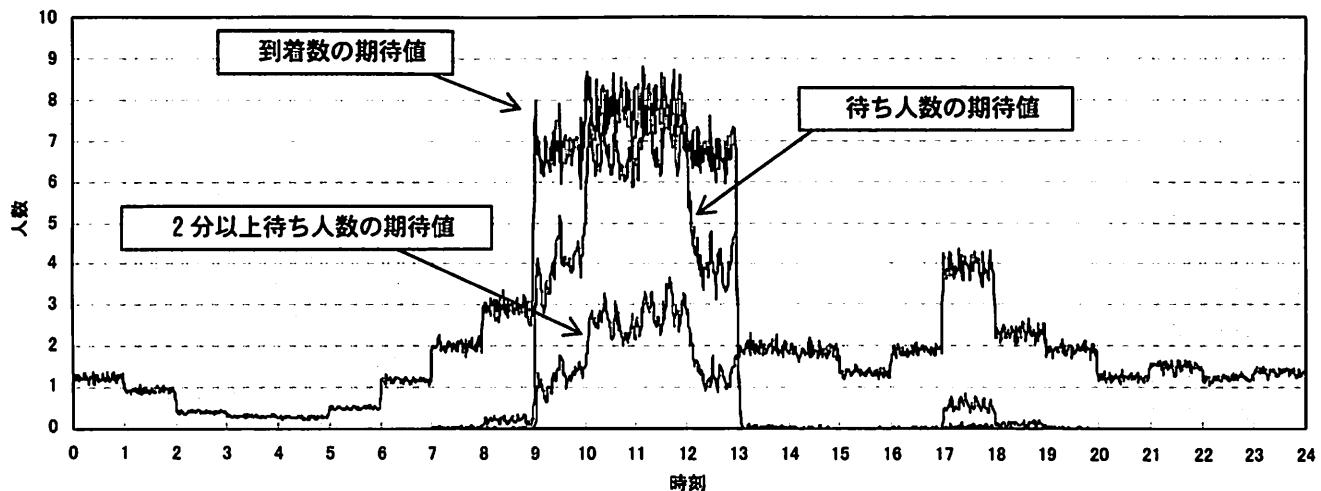


図-4 到着率及び待ち時間の予測結果（港北 PA・下り・女性）

いる。

次に、これらの到着確率と補正係数を用いて、待ち行列発生状況をシミュレーションにより再現した（Phase-3）。図-4に、現行の窓口数の場合における到着確率及び待ち時間の予測結果を示している。横軸は時刻を表しており、深夜0時から24時間のシミュレーションの結果を表示している。当該施設の場合、9時から13時に利用客の到着が集中しており、期待到着人数は、1分間当たり平均で7～8人を示している。この時間帯において、待ち行列が発生しており、待ち人数の期待値は、1分間当たり平均で最大7人を超えており、さらには、そのうち、サービス水準である許容待ち時間2分を超過して待ちが生じている人数が、最大で3人を超えており、当該施設の現行の窓口数は33個であり、現行の施設数では、利用客が集中する時間帯において、待ち行列が発生し、サービス水準を維持できないことがシミュレーション結果より示された。

(3) 最適窓口数の算定

次に、対象施設の窓口数を変化させ、サービス水準である許容待ち時間2分を満足するために必要となる窓口数（最適お手洗い便器数）を算出した。表-3には、対象の6つのSA・PA、23施設の現行の窓口数、シミュレーションによって算出した最適窓口数、現行と最適窓口数の増減を示している。さらに、図-5には、港北PA・下り・女性についての、2分以上待ち行列が発生する確率と窓口数の関係を図示している。窓口数が多い場合、待ち行列の発生確率が少な

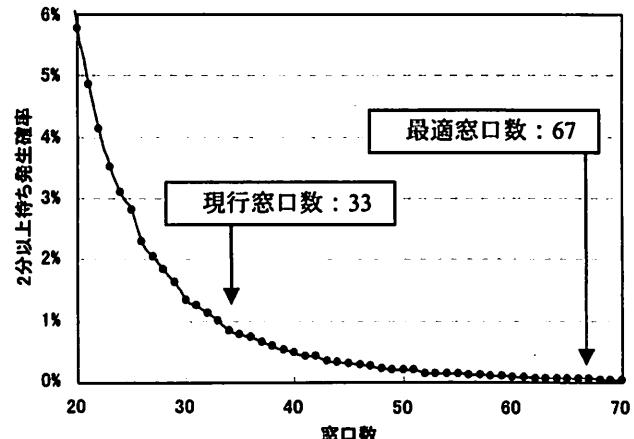


図-5 2分以上待ち発生確率と窓口数の関係
(港北 PA・下り・女性)

くなる関係が明確に表現されている。当該施設の場合、現行の窓口数33個では、約1%の待ち行列発生確率が生じている。サービス水準を満足するための最適窓口数は67個必要であることを示している。なお、最適窓口数の設定にあたっては、2分以上待ち発生確率が0.1%未満（有意水準99.9%以上）を満足する際の窓口数を採用している。

現行の窓口数で待ち行列の発生が確認される施設の最適窓口数は、現行の窓口数よりも多い数を示しており、例えば、海老名SA・上り・女性（右）では、現行窓口数が50個であるのに対し、最適窓口数は96個となり、46個（92%）の窓口数の増設の必要性を示している。一方、現状、待ち行列の発生頻度が高くない施設では、サービス水準を維持しているものと想定され、最適窓口数の算出結果は、現行の窓口数よりも少ない結果となっている。また表-3には、現行の窓口数の場合における利用客の最大待ち時間の

表-3 最適窓口数及び最大待ち時間の算定結果

施設名称	窓口(便器)数			最大待ち時間(分)
	現状	最適	増減	
港北PA	下り・女性	33	67	34
	上り・女性(右)	50	96	46
	上り・女性(左)	30	39	9
	下り・女性(右)	52	76	24
海老名SA	下り・女性(左)	32	62	30
	上り・女性(東)	56	42	△ 14
	上り・女性(西)	20	37	17
	下り・女性(東)	21	47	26
足柄SA	下り・女性(西)	49	42	△ 7
	上り・女性	28	36	8
	上り・男性	6	7	1
	下り・女性	25	34	9
富士川SA	下り・男性	6	7	1
	上り・女性	34	27	△ 7
	上り・男性(大)	7	10	3
	上り・男性(小)	28	13	△ 15
遠州豊田PA	下り・女性	32	40	8
	下り・男性(大)	8	7	△ 1
	下り・男性(小)	26	12	△ 14
	上り・女性	9	9	0
西湘PA	上り・男性(大)	2	3	1
	下り・女性	17	16	△ 1
	下り・男性(大)	5	6	1
				3

算出結果を併記している。例えば、足柄 SA・下り・女性(東)においては、最大待ち時間が 15 分となっており、サービス水準を大幅に超過している。

以上のように、本研究で提案した最適窓口数決定モデルを用いて、到着確率の推計や最適窓口数、最大待ち時間を算出することで、お手洗い休憩施設のリニューアル計画に有用な情報を提供することが可能となる。ただし、本適用事例で用いたログデータは、高速道路利用客数の季節変動等を考慮せず、調査期間内のすべてのデータを用いて分析した結果である。詳細なリニューアル計画を立案する場合には、繁忙期、通常期、閑散期、さらには日・曜日別の推計が必要となるが、この場合においても、ログデータを分割することで、同様の手順にて分析することが可能である。また、各時期のログデータの傾向を十分に把握し、それぞれの時期に対する分析結果に応じた分割可能なお手洗いの配置計画を実施し、分割運用実施の可能性等を含めた、ハード・ソフト両側面における総合的な対策を検討することで、最適なサービスを提供することを可能とする。加えて、合理的な窓口数提供を運用することによって、通常時、閑散期の維持管理費の削減が期待できる。

7. おわりに

本研究では、高速道路のサービス施設の最適窓口

数を決定する方法論を提案した。まず、利用客の実際の利用時間に関する観測データを用いて、サービス系にランダムに到着する利用客の到着確率を推計した。その際、待ち行列が発生している時間帯において到着数を直接的に観測不可能な場合においては、連続待ち行列発生時間に関する実測データにより、待ち行列が発生しない時間帯における平均的な到着確率からの乖離度合を表す補正係数パラメータを算出する方法論を開発した。さらには、施設毎に推計した到着確率から、待ち行列の発生過程を再現するシミュレーションモデルを開発し、施設のサービスレベルを最大待ち時間として定義したときの所与のサービスレベルを満足するために必要な最適窓口数(必要お手洗い便器数)を算出する方法を開発した。最後に、本研究で提案した手法論を、東名高速道路のお手洗い休憩施設の最適窓口数決定問題に適用し、本手法の適用可能性を確認した。その結果、施設の利用特性に応じたサービス施設の最適窓口数を客観的に算出可能であることを示した。本手法を用いて更なる分析を試みることにより、その結果をお手洗いのリニューアル計画に反映させ、各施設の最適窓口数の算定が可能となり、利用客へ最適なサービスを提供することが可能となる。本研究で提案した最適窓口数決定モデルは、お手洗い休憩施設のほか、利用客の利用状況に関するデータが取得可能なサービス施設へ幅広く適用の可能性があり、今後更なる適用事例を積み重ねていく必要がある。

今後、本手法を用いた最適窓口数決定に関する意思決定の場面において、更なる分析手法の精緻化が要求される場合も考えられる。本研究で採用した単純なシミュレーションモデルについても、より現実的な状況を再現するために、利用客及びサービス窓口個々の特性を考慮したマルチエージェント型モデルへの拡張が考えられよう。本手法を用いて更なる適用事例を積み重ねることとともに、対象とする待ち行列メカニズムの状況に応じたモデルの拡張が今後の課題である。一方、本研究では、待ち時間のサービス水準(許容待ち時間)を任意に設定した分析を試みた。本研究で提案した方法を用いれば、任意に設定したサービス水準に対するシミュレーション結果を導出することが可能である。しかし、サービス水準の妥当性について議論するためには、継続的

な顧客満足度調査等による検証が必要となる。今後は、ロジックモデル等を用いたPDCAサイクルによる継続的な改善のための検討を行うことも必要となる。また、現実のお手洗いのリニューアル計画を検討する場合には、既存施設を活用することを念頭に計画を立案することが必要となる。このため、既存施設の状況によっては、ハード整備では最適な窓口数を確保できない場合も考えられる。このような場合においても、当該施設の空間計画の見直しを含めたハード整備に加え、施設の利用時間の削減、混雑状況に応じた分割運用による利用客の配分等のソフト施策を含めた総合的なリニューアル計画を検討することが必要である。

【参考文献】

- 1) 山本浩司, 松島格也, 岡田貢一, 青木一也, 小林潔司: 共分散構造モデルを用いた高速道路の休憩施設の整備効果分析, 土木学会建設マネジメント論文集 Vol.15, pp81-90, 2008.
- 2) 例えば, 宮沢政清: 待ち行列の数理とその応用, 牧野書店, 2006.
- 3) Bell, C.E. and S. Stidham : Individual versus Social Optimization in the Allocation of Customers to Alternative Servers, *Management Science*, Vol.29, No.7, pp.831-839, 1983.
- 4) Igaki, N., Yamakawa, S. and Sumita, U. : Social Benefit Analysis of Congestion Systems with Heterogeneous Users : *Mathematica Japonicae*, Vol.51, No.2, pp.279-291, 2000.
- 5) Stidham, S. : Pricing and capacity decisions for a service facility : Stability and multiple local optima, *Management Science*, Vol.38, No.8, pp.1121-1139, 1992.
- 6) Yechiali, U. : Customers' optimal joining rules for the GI/ M/ s queue, *Management Science*, Vol.18, No.7, pp.434-443, 1972.
- 7) 村川三郎, 坂上恭助, 越川康夫, 高津靖夫, 仲川ゆり: 駅舎における乗降者数とトイレ利用者数の検討, 日本建築学会計画系論文集, 第 522 号, pp.91-96, 1999.
- 8) 越川康夫, 村川三郎, 坂上恭介, 高津靖夫, 仲川ゆり: 駅舎トイレにおける器具使用とその特性の検討, 日本建築学会計画系論文集, 第 528 号, pp.59-65, 2000.
- 9) 貝戸清之, 小林潔司, 加藤俊昌, 生田紀子: 道路施設の巡回頻度と障害物発生リスク, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.1, pp.16-34, 2007.
- 10) Pickands, J.: The two-dimensional process and extremal processes, *Journal of Applied Probabilities*, Vol.8, pp.745-756, 1971.

An Optimal Number Design Model of Service Windows for the RSA Facilities on Expressways

By Kouji YAMAMOTO, Kazuya AOKI, Kiyoyuki KAITO and Kiyoshi KOBAYASHI

This paper focuses upon the optimal number of service windows for Rest and Service Area (RSA) facilities on expressways. The arrival phenomena of the customers to the service facilities are formulated as mixed Poisson processes, and a methodology was proposed to decide the optimal number of service windows to satisfy the service level under a given condition by forecasting the queuing process of the service facilities using Monte-Carlo simulation. The arrival events of the customers, which are subject to the mixed Poisson processes, are expressed as the probabilities of excesses over the threshold using log database of service time for each window. However, when the queue occurs in the service facilities, the arrival rates cannot be directly measured from the log data. We developed a methodology to estimate the maximum likelihood rates of deviation from the average arrival probability by use of Monte Carlo simulation based upon the occupancy data of the facilities in busy periods. Furthermore, the simulation model is formulated to investigate the optimal number of windows, which is designed to keep the service levels. Finally, the practical availability was investigated by a case study dealing with the service windows for RSA facilities on the Tomei-Expressway.