

旅客流動シミュレーションを用いた空港旅客ターミナルの窓口施設規模の最適化*

Optimising the Size of Counters in an Airport Terminal with Passenger Terminal Simulation *

山田忠史**・伊藤祥展***

By Tadashi YAMADA・Yoshinobu ITOH

1. はじめに

移動の高速化や国際化の進展を背景として、航空需要は着実な伸びを見せている。国際空港では、ハブ空港としての地位を確保すべく、空港間競争も激しい。このような状況に対応すべく、わが国を始めとして各国において、空港の整備・拡張が進められている。しかし、空港を整備・拡張するにおいて、空港利用者の利便性への配慮や建設・運営コストの高騰など、様々な課題が指摘されている。これらの課題は、空港のエアサイドやグランドサイドだけでなく、空港旅客ターミナルにも当てはまり¹⁾、これらの要件が満たされるように、空港旅客ターミナルの施設規模が適正に決定される必要がある。そのためには、各施設の滞留人数を考慮しながら、現実のターミナルをモデル化することが有効である¹⁾。本研究の目的は、空港旅客ターミナル内における旅客流動と窓口施設²⁾(本研究では、チェックインカウンター、セキュリティチェックを対象とする)に着目し、旅客流動シミュレーションを内包した窓口施設の最適規模決定手法を提案することにある。

空港旅客ターミナル施設に関する既存の研究は、施設内の旅客流動と施設の規模・配置に関する研究に大別できる。前者については、シミュレーションにより、詳細な旅客流動を表現する試み^{3)~5)}がなされている。一方、後者については、個々の窓口施設の適正規模の検討⁶⁾や円滑な旅客移動のためのスペース規模決定⁷⁾などが行われてきたが、数理最適化問題としての枠組みの明確化や窓口施設間の移動の考慮について言えば、研究蓄積が十分ではない。本研究の特徴は、窓口施設規模の最適化手法の構築と、その手法に旅客流動シミュレーションを組み込むことにある。つまり、個々の窓口施設間の旅客移動を考慮した上で、窓口施設規模の最適化を検討する。しかし、詳細で複雑な旅客流動シミュレーションモデルを最適化モデルに内包するのは、計算時間の面などで実用的ではないことが指摘されている⁸⁾。したがって、本研究

表-1 調査概要

観測場所	調査項目	調査方法
ターミナル出入口	到着時刻, 到着人数	ストップウォッチ計時, 数取器
チェックインカウンター	到着時刻, 到着人数, サービス時間, 開設窓口数, 設置窓口数	ストップウォッチ計時, 数取器
セキュリティチェック	到着時刻, 到着人数, サービス時間, 開設窓口数, 設置窓口数	ストップウォッチ計時, 数取器
バゲージルーム	ターミナル内での旅客行動(利用施設, 滞在時間など*)	アンケート調査
各施設間	距離計測	メジャー計測

*年度により調査項目が異なる

では、窓口施設間の移動と窓口施設での旅客の滞留現象のみに焦点を当てた、簡便なシミュレーションモデルを構築する。

2. 空港旅客ターミナル調査

旅客流動の実態把握と、窓口施設規模の最適化に必要な入力値を得るために、平成11,12年の11月に大阪国際空港において旅客流動に関する調査を行った。なお、調査人員の都合上、航空会社1社のみが使用している大阪国際空港南ターミナルを調査対象とした。表-1は、調査項目と調査方法を簡潔に示したものである。本研究では、窓口施設での旅客の滞留を表現するために、待ち行列シミュレーションを適用する。したがって、各窓口施設への旅客の到着分布とサービス時間分布を同定しておく必要がある。調査結果に基づく分布型同定の結果^{9),10)}、手動チェックインカウンターでのサービス時間分布は3次アーラン分布に適合し¹¹⁾、自動・スーパーシートカウンターにおけるサービス時間分布は、それぞれ2,3次のアーラン分布に適合した。また、チェックインカウンターの到着分布は、いずれもポアソン分布に適合した。

一方、セキュリティチェックにおけるサービス時間分布は、14次アーラン分布に適合した。つまり、チェックインカウンターに比べて、サービス時間の規則性が高い。セキュリティチェックへの到着状況は、それまでの旅客ターミナル内での行動に依存する。したがって、セキュリティチェックへの到着に関しては、分布型を

*Keywords: 空港計画, ターミナル計画

** 正会員, 博士(工学), 広島大学大学院工学研究科, (東広島市鏡山1-4-1,

TEL:0824-24-7812, E-mail: yamada@naoe.hiroshima-u.ac.jp)

*** 正会員, 修士(工学), 東日本旅客鉄道株式会社

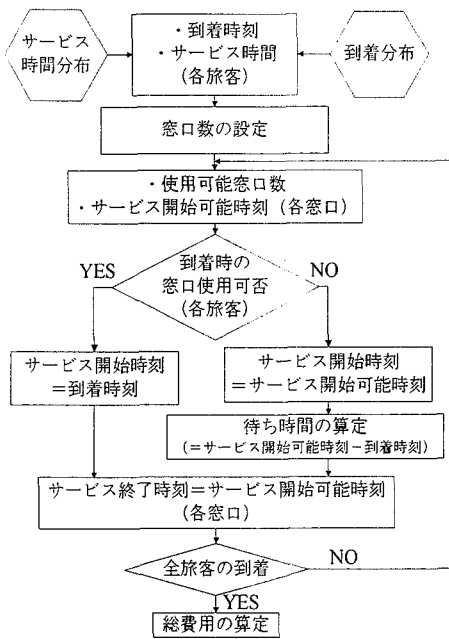


図-3 待ち行列シミュレーション

とが予想されるが、サンプル不足のために、シミュレーションでは、そのことが十分に反映されていない。しかし、到着人数の経時的な変化の傾向は再現できていることから、構築した旅客流動シミュレーションモデルは、空港内の旅客流動を概ね捉えているものと考えられる。

旅客流動シミュレーションの妥当性をさらに検討するため、チェックインカウンターからセキュリティチェックまでの各旅客の所要時間を、シミュレーション値とアンケートから得られた値とで比較した (図-5)¹⁶⁾。空港旅客ターミナル内での滞在時間の再現性も良好であることが窺える。

4. 窓口施設規模の決定

本研究では、各窓口において、考察対象期間内に旅客が消費する総費用が最小である時の窓口数を最適とする。総費用は、窓口施設に要する費用と、施設内で旅客がサービスを受けるために費やす費用 (時間費用) との和から構成される。窓口施設費用は、空港施設利用料などを通じて、旅客の負担に転嫁されるものと仮定している¹⁷⁾。したがって、最適窓口数は、両費用のトレードオフの下に決定される。各窓口の最適窓口数は、次の数理計画問題を解くことにより求められる。

$$\begin{aligned} \min C(X) &= \sum_i C_i(X) = \sum_i (C_{Bi} + C_{Pi} + C_{Si}) \\ &= \sum_i (c_{bi} \cdot T \cdot \max_k x_{ik} + c_p \sum_j (t_{i,j}^h(X) + t_{i,j}^w(X)) + c_{si} \cdot \text{TAL}_{qi}(X)) \end{aligned} \quad (1)$$

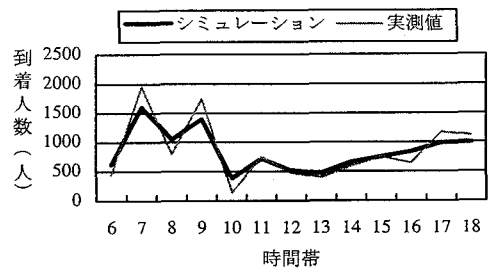


図-4 セキュリティチェックにおける到着人数

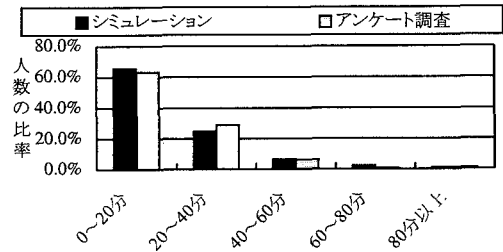


図-5 チェックインカウンターからセキュリティチェックまでの所要時間

subject to

$$x_{ik} \leq M_i \quad (2)$$

ここに、

C : 総費用 (円)

X : 窓口数を表す数列 ;

$$X = \langle x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1K}, x_{21}, \dots, x_{2K}, \dots, x_{IK} \rangle$$

x_{ik} : 窓口施設 i の時間帯 k の開設窓口数 (ブース)

I : 計算対象となる窓口施設の総数; given

K : 計算対象となる時間帯の総数; given

C_i : 窓口施設 i に要する総費用 (円)

C_{Bi} : 窓口施設 i の整備・運営費用 (円)

C_{Pi} : 旅客が窓口施設 i の利用に要する費用 (円)

C_{Si} : 窓口施設 i のフロア整備・運営費用 (円)

c_{bi} : 窓口施設 i の 1 ブースあたりの費用 (円/日・ブース); given

T : 考察対象期間 (日); given

c_p : 旅客 1 人あたりの時間価値 (円/人・時); given

$t_{i,j}^h$: 窓口施設 i の j 番目到着旅客のサービス時間

$t_{i,j}^w$: 窓口施設 i の j 番目到着旅客のサービス待ち時間

c_{si} : 窓口施設 i の単位フロア整備・運営費用 (円/㎡・日); given

A : 旅客 1 人あたりの占有面積 (㎡/人); given

L_{qi} : 窓口施設 i の平均待ち人数 (人)

M_i : 窓口施設 i の設置窓口数の上限値 (ブース); given

決定変数 X は、各時間帯の開設窓口数を決定することを意味する。つまり、式(1), (2)に示された数理計画問題

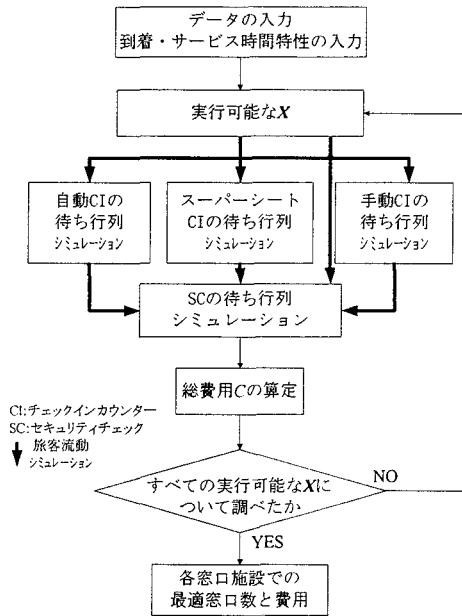


図-6 最適窓口数の決定フロー

は、時間帯ごとの窓口数の最適組み合わせを探索することになる。このとき、設置すべき窓口数は、各時間帯の最適窓口数の最大値になる。また、式(1)の右辺第三項から、最適窓口数下でのフロア面積が決定される。

式(1)において、単位費用 c_{bb} , c_p , c_a はあらかじめ与えられる。 c_p については、個人所得と空港の利用頻度との関係¹²⁾に基づいて算出した⁸⁾。また、 $t_{i,j}^h, t_{i,j}^w, L_{qi}$ は、旅客流動および待ち行列シミュレーションの結果から求め、 $t_{i,j}^w, L_{qi}$ は開設窓口数 X に影響を受ける。なお、窓口を利用する旅客1人あたりのフロア占有面積 A については、IATA (International Air Transport Association) で定められている最も標準的なサービスレベル (1.41 (m²/人)) を使用した。

図-6は、最適窓口数を決定するための計算フローを簡潔に整理したものである。単位費用などの入力データと到着・サービス時間に関する分布型、および、開設窓口数 X が与えられれば、チェックインカウンター、セキュリティチェックへと、旅客流動および待ち行列シミュレーションが進む。チェックインカウンターの窓口数は、旅客流動シミュレーションを通して、セキュリティチェックでの到着や滞留現象に影響を及ぼす。つまり、開設窓口数 X が変化すれば、旅客流動および待ち行列シミュレーションを介して、総費用 C も変化する。開設窓口数 X を変更するたびに、シミュレーションを実行する必要がある。すべての実行可能な開設窓口数に対して、シミュレーションを実行し、式(1)に示された総費用 C を算定すれば、総費用 C を最小にするような開設窓口数、すなわち、最適開設窓口数が求解できる。

5. 手法の適用

大阪国際空港南ターミナルを対象として、調査日の一日間を考察対象期間として、構築した手法の適用を試みた。分析対象とした大阪国際空港南ターミナルでは、稼働時間が13時間である。また、本研究では設置可能な窓口数の上限値を、各窓口について最大15ブースと仮定した。なお、窓口数の上限値の決定は、最適解の中の最大開設窓口数とその範囲内に収まるように試行錯誤した結果に基づいている。したがって、実行可能な窓口数の組み合わせは、窓口一つだけでも15¹³通りに及び、最適解を求めるための計算時間が膨大になる。そこで、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて近似解を求めた。GAのパラメータについては、個体数500、世代数100、エリート個体数50、交叉率 (一様交叉) 1.0、突然変異率0.1と設定した。

c_b については、手動およびスーパーシートチェックインカウンターの場合10957 (円/日・ブース)、自動の場合、40656 (円/日・ブース)、セキュリティチェックの場合4673 (円/日・ブース)とした。これらについては、窓口1ブースあたりの運営費用 (人件費、維持・管理費など) や耐用年数も考慮した上での設置費用を基にして算定している。また、 c_p についても同様に、いずれの窓口も共通で1036 (円/m²・日)、 c_a については、上述の通り、個人所得と空港の利用頻度との関係¹²⁾に基づいて1004 (円/時) と算定した。

手動・自動・スーパーシートのそれぞれのチェックインカウンターにおいて最適窓口数を算出した結果が、表-2である。また、表-2には、現状の開設窓口数も示されている。スーパーシートチェックインカウンター、および、自動チェックインカウンターの現状の開設窓口数は、それぞれ13、2ブースである。なお、手動、自動、スーパーシートのチェックインカウンターの設置窓口数は、それぞれ、9、13、2ブースである。

各時間帯の最適窓口数と比較すると、自動チェックインカウンターでは、開設窓口数が過剰傾向にある。一方、スーパーシートカウンターについては、到着人数がピークを迎える時間帯において、待ち行列長が大きくなることから、最適窓口数が開設窓口数を上回るものと考えられる。手動チェックインカウンターも同様の理由により、窓口数の増設が有効であった。手動チェックインカウンターの最適窓口数は、時間帯によって窓口数を大幅に増減させることが効果的であることを示唆している。

今回の計算結果では、手動チェックイン窓口を増設し、自動チェックイン窓口を削減するのが有効となった。この結果は、調査当日の各チェックインカウンターの利用率 (手動が60%、自動が30%、スーパーシートが10%) を反映している。しかし、荷物を預けない旅客は、自動

表-2 最適窓口数と開設窓口数(チェックインカウンター)

時間帯	6	7	8	9	10	11	12
開設窓口数(手動CI)	7	6	6	5	4	6	6
最適窓口数(手動CI)	8	14	5	12	6	4	2
開設窓口数(自動CI)	13						
最適窓口数(自動CI)	9	6	1	4	6	3	1
開設窓口数(スーパーシートCI)	2						
最適窓口数(スーパーシートCI)	3	5	6	3	2	3	2
時間帯	13	14	15	16	17	18	
開設窓口数(手動CI)	4	5	4	6	6	6	
最適窓口数(手動CI)	3	10	5	2	13	7	
開設窓口数(自動CI)	13						
最適窓口数(自動CI)	4	3	6	8	6	3	
開設窓口数(スーパーシートCI)	2						
最適窓口数(スーパーシートCI)	4	2	3	4	5	1	

*CIはチェックインカウンターを表す。

*表中の□で囲んだ数字が、整備すべき窓口数(設置窓口数)。

*時間帯の数値は、例えば6の場合、6:00~7:00の一時間を意味する。

表-3 最適窓口数と開設窓口数(セキュリティチェック)

時間帯	6	7	8	9	10	11	12
最適窓口数	8	10	6	8	3	5	2
開設窓口数	3	6	4	5	6	5	3
時間帯	13	14	15	16	17	18	
最適窓口数	5	3	3	2	8	5	
開設窓口数	4	3	3	2	5	5	

*表中の□で囲んだ数字が、整備すべき窓口数(設置窓口数)。

*時間帯の数値は、例えば6の場合、6:00~7:00の一時間を意味する。

チェックインカウンターを利用した方が手動チェックインカウンターに比べて、チェックインに要する時間を大幅に縮減できる可能性がある。したがって、今後は、自動チェックインの需要の増大が見込まれるので、各チェックインカウンターの利用率も変化する可能性が高い。自動チェックイン窓口を削減する方がよいとの知見は、調査対象日の限定的なものである可能性がある。すなわち、自動チェックインカウンターの利用率が高まれば、手動チェックインカウンターを減らすべきとの結果が得られることが予想される。

表-3は、セキュリティチェックの最適窓口数を示している。セキュリティチェックの設置窓口数は6ブースである。手動チェックインカウンターと同様に、旅客の到着特性に応じて、窓口数を大きく増減させるのが効果的である。

現状(Case 0)、最適解(Case1)における設置窓口数、費用、フロア面積を示した結果が表-4である。なお、このとき、比較のために、“チェックインカウンターの開設窓口数を、一日を通して一定として最適解を求めた場合(Case2)”、“開設窓口数の上限値を、現状の設置窓口数までとして最適解を求めた場合(Case3)”についても計算を行った。Case2でセキュリティチェックの開設窓口数を一定値になかったのは、ピーク時とオフピーク時の滞留人数の差

表-4 各最適解と現状値との比較

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 0
設置窓口数	手動CI	14	13	9	9
	自動CI	9	9	9	13
	スーパーシートCI	6	4	2	2
	セキュリティチェック	10	10	6	6
費用	CI全体	48.2	47.1	67.8	71.4
	セキュリティチェック	32.6	34.4	72.3	76.6
	総費用	80.8	81.4	140.1	148.1
フロア面積	手動CI	83.2	80.4	103.4	116.3
	自動CI	13.5	14.6	48.6	57.2
	セキュリティチェック	208.3	208.2	301.2	320.4
	スーパーシート	35.4	28.4	27.0	25.8

*費用の単位は(万円/日)、面積の単位は(m²)

*CIはチェックインカウンターを表す

が激しく、時間帯ごとに開設数を変動させることが有効であることが明白だからである。

実際の開設窓口数(Case 0)と最適解(Case1)を比較すると、Case1の方が、設置窓口数が多いにも拘わらず、費用が抑制されている。その理由は、設置窓口数が多くて、時間帯ごとの開閉が適宜なされれば、ピーク時の滞留人数削減の効果が、窓口数増大に相殺されずに済むからである。フロア面積の減少量からも、そのことが窺える。Case1とCase2を比較すると、計算結果にほとんど差が生じていない。この計算結果のみで判断するのは早計であるが、チェックインカウンターのように、旅客の滞留現象が比較的穏やかな施設では、時間帯によらず開設窓口数を一定としてもよい可能性がある。Case3では、Case0よりも費用が抑制される結果となった。自動チェックインカウンターの削減が有用であることは、先述の考察結果と整合する。

6. おわりに

本研究では、空港旅客ターミナル施設計画において有効な、旅客流動シミュレーションを用いた窓口施設規模決定手法の概略を示した。この手法を既存ターミナルに適用した結果、旅客流動シミュレーションにおいては、セキュリティチェックにおける予測到着人数と実測人数とに良好な相関関係が確認された。また、窓口施設の規模については、計算対象日の利用状況を反映した、適正な解が得られた。

本論文で示した計算結果は限定的である。本研究で提案した旅客流動シミュレーションや窓口施設の規模決定手法は、搭乗口を含む国内出発線だけに限らず、国内到着線や国際線にも適用可能である。特に、国際空港に適用する場合には、出入国審査などの施設に対する旅客の到着・サービスや乗り継ぎ客の行動を追加しなければならない。また、計算対象となる窓口施設数が増加すると、実行可能解の増大に繋がるため、考察対象期間を通して

開設窓口数を一定として求解することやILS(反復局所探索法)の適用などを検討する必要がある。

また、空港旅客ターミナル内での旅客流動の再現性を高める必要もある。そのためには、歩行速度や利用施設選択率に、性別・年齢・目的などの旅客の個人属性を反映させるべきであろう。さらに、本研究では、航空需要を与件として分析しているが、実際には、航空会社のフライトスケジュールや戦略、航空会社間あるいは輸送モード間の競争によって需要は変動する。このような需要変動をいかにして取り込むかについても、今後の研究課題として残されている。

末筆に、本研究の遂行にあたっては、故則武通彦先生(関西大学教授)の研究成果に着想を得た。ここに記して、謝意を表するとともに、先生のご冥福をお祈りいたします。

【補注】

- [1] 待ち行列理論では、客に対してサービスを行うステーションのことを窓口と呼ぶ。また、この窓口に相当するような、サービスを行うための施設を窓口施設と呼ぶことがある。本研究では、空港旅客ターミナル施設のうち、出発もしくは到着に必要な手続きのために旅客が利用する施設で、到着とサービスの仕方によって旅客の滞留現象が生じるような施設を窓口施設と呼んでいる。空港旅客ターミナル内の窓口施設には、本研究が対象とするチェックインカウンターやセキュリティチェックだけでなく、搭乗口や出入国審査などが考えられる。
- [2] 手動チェックインカウンターの分布型同定には、団体旅客のチェックインも含まれている。当然ながら、団体旅客のサービス時間は、個人旅客のサービス時間よりも長くなる傾向が見られた。
- [3] 搭乗口を検討対象としなかったのは、調査が実施できなかったためである。課題にも述べたように、本研究の対象窓口は限定的であり、既存空港への適用例も、手法の有用性を検討するという点で特に意味を持つことに留意されたい。
- [4] アンケート調査の目的は、ターミナル内での旅客の行動(利用施設、滞在時間など)を把握することである。急を要する旅客にもできる限りアンケートに協力してもらうためには質問項目を制限する必要があった。そのため、回答者の個人属性については、詳細に尋ねることができなかった。
- [5] チェックインカウンターにおける到着人数とサービス時間、および、セキュリティチェックにおけるサービス時間については、外生的に与えた確率分布に基づき決定しているため、シミュレーションの再現性が高いことが自明であり、そのことは計算結果からも確認された。
- [6] アンケート調査から得られた滞在時間は、平成11年度調査の結果であり、シミュレーション上の利用施設選択率は平成12年度調査の結果を用いている。

[7] 本研究では、以降において、窓口施設費用のすべてが、旅客に転嫁されると仮定して計算している。転嫁される比率については今後、検討する必要がある。また、本研究で提案する手法を実用化するには、旅客ターミナル以外の空港施設に要する費用についても、旅客が負担する範囲を検討する必要がある。

[8] 本研究では、窓口施設で旅客が費やす費用 C_{pi} を、個人所得と空港の利用頻度から求めた時間価値、および、窓口でのサービス時間と待ち時間を用いて計算している。しかし、式(1)からも明らかのように、 C_{pi} は最適窓口数の計算結果に大きな影響を及ぼすので、空港旅客ターミナル内での C_{pi} の計算範囲や、その単位費用 c_p の求め方については、今後十分に検討する必要がある。

参考文献

- 1) Parizi, M.S. and J.P. Braaksma: An optimum resource utilization plan for airport passenger terminal buildings, *Transportation Research Record*, No.1506, pp34-43, 1995.
- 2) 山本幸司, 谷口康一, 木俣昇: 国際旅客ターミナル施設計画支援用旅客動態分析システムの開発, 土木計画研究・論文集, No.8, pp.225-232, 1990.
- 3) Vandebona, U. And D. Allen: Passenger flow distributions at airports, *Transportation Research Record*, No.1423, pp40-46, 1993.
- 4) Reynaldo, S.J. and B.G. Hutchinson: passenger-terminal simulation model, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.120, No.4, pp. 517-535, 1994.
- 5) Jim, H.K. and Z.Y. Chang: An airport passenger terminal simulator - A planning and design tool -, *Simulation Practice and Theory*, Vol.6, No.4, pp387-396, 1998.
- 6) Mckelvey, F.S. and R. Horonjeff: *Analytical methods, - planning and design of airports -*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- 7) Seneviratne, P.N. and N. Martel: Space standards for sizing air-terminal check-in areas, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.121, No.2, pp.141-149, 1995.
- 8) Littler, R.A. and D. Whitaker: Estimating staffing requirements at an airport terminal, *Journal of the Operational Research Society*, Vol.48, No.2, pp.124-131, 1997.
- 9) 伊藤祥展, 則武通彦, 山田忠史, 井川智博: 空港ターミナルにおけるチケットカウンターの規模決定, 平成12年度土木学会関西支部年次学術講演概要, pp.IV-25-1-IV-25-2, 2000.
- 10) 戸鹿島宗一, 則武通彦, 山田忠史: 空港旅客ターミナル施設の規模決定に関する一考察, 平成9年度土木学会関西支部年次学術講演概要, pp.IV-109-1-IV-109-2, 1997.
- 11) 阿久津邦夫: 歩行の科学, 不昧堂新書, 1975.
- 12) 総務庁統計局: 家計調査年報, 1999.

旅客流動シミュレーションを用いた空港旅客ターミナルの窓口施設規模の最適化*

山田忠史**・伊藤祥展***

本研究では、空港旅客ターミナルの窓口施設に注目し、旅客流動シミュレーションを用いて窓口施設を最適化する方法を提示した。この手法により、最適な窓口数が時間帯ごとに算定されるとともに、窓口数に応じて最適なフロア面積が算出される。旅客流動シミュレーションにおいては、既存空港での観測から得られた利用施設選択率などに基づいて旅客流動を再現し、待ち行列シミュレーションによって旅客の滞留現象を表現した。既存空港のチェックインカウンターとセキュリティチェックに、この手法を適用した結果、旅客流動の再現性が確認されるとともに、計算対象日の各窓口施設の利用実態に即した、適正な施設規模が算出されることが示された。

Optimising the Size of Counters in an Airport Terminal with Passenger Terminal Simulation *

By Tadashi YAMADA**・Yoshinobu ITOH***

This paper presents a simulation model using the queuing theory for optimising the size of counters in an airport terminal. This model incorporates a passenger terminal simulator for representing the passenger flow in the airport terminal. Queuing at each counter can also be represented within the simulation model developed. Optimal sizes of counters are determined in this model so that the total cost incurred by passengers can be minimised. The model was applied to the counters in an actual airport terminal. The simulation results showed the good agreement with real passenger flow, and the optimal solution was successfully obtained.
