

ネットワーク均衡分析による関西3空港における機能分担に関する考察*

A Study on Multiple Airport System in Osaka Metropolitan Area: Network Equilibrium Model Approach *

竹林幹雄**・黒田勝彦***

By Mikio TAKEBAYASHI** and Katsuhiko KURODA***

1. はじめに

2006年2月に神戸空港が開港し、大阪を中心とする関西地方は50km圏内にB747が離発着可能な空港を3つ有するという、本格的な複数空港時代を迎えることになった。滑走路数でいえば、2007年8月の関西空港第2滑走路供用によりB767以上の機材が離発着可能な滑走路数は4本となり、関西空港の本格的24時間運用と相まって膨大な需要に対応できる巨大空港システムが現出することになる。

一方で、複数空港が存在する状況下では、効率的な運用を行うことが今まで以上に重要となる。空港の機能それ自体は、国際線の有無という差異はあるものの、基本的に同じである。このため、機能的に重複するものが多い場合、エアラインが自由に路線設定を行うのであればエアラインにとって収益性の高い空港に路線設定が集中し、その結果特定の空港への需要の集中が生じ、特定空港での混雑の深刻化や空港によっては有休損失を生む可能性がある。反対に路線設定に関して政策的に誘導した場合、誘導を適切に行わなければ、いたずらに旅客需要を分散させ、結果として過小供給を生じさせる可能性がある。このように、複数空港が存在する場合、適切な運営方法を実施しなければ、効率的運用が本来的に目的としているエアラインや利用者の便益向上に資さない恐れがある。

諸外国、特に欧州や米国では複数空港運営に関して、ペリメータ・ルール¹の適用や乗り入れ機材の制限など運営をルール化し、非効率的な運営を回避する努力が行われてきたことは広く知られている。

わが国でも大阪空港と関西空港との機能分担¹が議

*キーワード：国内航空旅客輸送市場、関西3空港

**正員，工博，神戸大学工学部建設学科

(神戸市灘区六甲台町1-1, TEL078-803-6006,

email: takebaya@kobe-u.ac.jp)

***フェロー会員，工博，神戸市立工業高等専門学校

¹ ここでいう機能分担とは国際・国内線のみならず、国内線方面別、キャリア別という意味も含む。

論されて久しいが、大阪空港への就航規制が緩和されて以降、「伊丹シフト」が生じ、関西空港と大阪空港の需要バランスが再三問題視されるようになった。さらに大都市に近接する空港として大阪空港の他に神戸空港が設置されたことでよりいっそう問題が複雑になったといえよう。

このように関西地方では複数の空港が域内に存在し、互いの機能分担をどのように行うのかが関西全体の航空輸送を考える上できわめて重要な問題となっている。機能分担の変更はトレンドを大きく変える可能性があり、エアライン・旅客双方の行動の変化を明示的に考慮しなければ、空港運営方法のドラスティックな変化など政策上の大きな変更に関する検討を行うことは困難である。

一般的に、機能分担とは国内線・国際線の設定に関して論じることが多い。関西地方においても、この点に関しての議論が必要である。しかし、例えば関西空港で重要な機能として考えられている「内際乗り継ぎ機能」に関しても、まず国内線の需要を十分に満たさない限り、成立することは難しいと考えられる。このことを考えると、国内線配置問題をまず議論の俎上に載せることが必要であろう。

本稿ではこのような問題意識に鑑み、竹林¹⁾が提案したBi-Level市場モデルを関西圏発着航空旅客に適用し、関西3空港の特性の違いを明らかにするとともに、可能な国内線における機能分担の方法とそれを実現せしめる環境について考究する。

2. ネットワーク競争のモデル化

ネットワークデザインを含む航空旅客需要推計法はKanafani and Ghobrial³⁾が提案したLogit型の旅客配分を含むネットワーク設計モデルが嚆矢であり、後にDobson and Lederer⁴⁾の時空間ネットワーク設計モデル、あるいは最近ではAdler⁵⁾の提案した機材選択も考慮した複占市場モデルなど数種提案されているが、実用レベルで示されたものとしては前出のKanafaniらの論文

やHsu and Wen⁶⁾などごく限られた範囲でしかない。

わが国に目を転じてみれば、同種の問題意識の上に構築された方法論としては、Furuichiら⁷⁾の提案した統合型需要推計モデル、Kanafaniらと同様に旅客の路線選択行動を取り入れ、さらに寡占市場におけるエアラインのネットワークデザインと価格戦略を同時に取り扱う大橋らのモデル⁸⁾、旅客行動に最適化行動を仮定し、空港での混雑の影響を考慮した竹林ら⁹⁾のモデルなどが挙げられる。いずれのモデルも、制約条件が非常に厳しいものであり、またエアライン間の競争を考えた場合、通常非凸型計画問題を解くことになるため、求解が非常に難しいという側面があった。また、ネットワークの規模がある程度以上になると物理的に計算が不可能になるなど、実用的な面で問題となることが少なくなかった。需要-供給の双方の影響が表現可能で、さらに構造が単純で操作性の良い需要推計方法が実務的には望まれよう。

本稿でベースとするBi-Level型航空旅客輸送市場¹²⁾は、上記のうち需要-供給の双方の影響を直接表現することができ、また空港の容量制約や着陸料といった基本的な政策変数の影響を把握することができる。また、旅客行動に関してはLogitモデルを基本とした均衡配分（ボトルネック付き利用者均衡分/SUE）を取り入れている。従来提案されてきたモデルでは、容量制約はエアライン側の制約であることが多かった⁸⁾⁹⁾。しかし、実際は旅客が座席の売り切れなども含め路線の状態を考慮して路線を選択するのであり、容量制約は旅客側の制約であると考えの方が現実的である。本モデルでは、こういったボトルネック付きSUEを旅客行動に導入することにより、より現実に即した路線選択行動を記述することが可能となっており、また数値計算に関して比較的取り扱いやすい構造となっている。また、計算規模に関しても、数値実験の結果から、経路の数が1,000~2,000程度であれば計算可能であることがわかっている。

さて、モデルで対象とされる市場は

- ① エアライン間の競争
- ② 旅客の路線選択行動

の2層で構成されるものとする。すなわち、エアラインに関しては旅客の行動に関する情報、および市場での行動制約（外的に決定された乗り入れ制限など）に差異がないものと仮定して問題を構成する。なお、以降特に断らない限り、国内市場での状況を鑑み、価格は外生化されているものとする。

(1) エアラインの行動

エアラインは自己の利潤を最大化するために、価

格や供給席数を制御する。欧米の航空旅客輸送市場では、一般的には、月単位~年単位のデータを用いた分析では、Cournot的な量的競争が生じることが知られている¹⁰⁾。本稿の分析も、基本的にこの知見を踏襲することとする。ただし、価格は前述のように固定化しているため、与えられた価格を実現する量的競争の分析を行うことになる。

エアライン n がリンク l で運営する頻度 f_l^n を明示的な戦略とすると考える。このときライバル企業（“- n ”として表記）の行動 \tilde{f}_{l-n} は最適反応であるとする。

今、OD市場 rs で経路 k を選択する旅客数 x_k^{rs} は、旅客の最適化行動 $\min : \Gamma(x_k^{rs})$ の結果得られるものとする。OD市場で設定される運賃 p_k^{rs} は経路ごとに与えられるものと仮定する。一方、エアラインはフライトごとの運航費用 $C_n^{OP}(f_l^n)$ および乗り入れている地点・空港に依存する固定費用 C_n^{FX} を支払わなければならないと考える。このとき、エアライン n の直面する利潤最大化問題は次のように表現される。

【エアラインの利潤最大化問題：AMAX】

$$\text{Object} : \pi^n(f_{l^n \in I^n}, \tilde{f}_{l-n \in I^{-n}}) = \sum_{rs} \sum_k p_k^{rs} x_k^{rs} \delta_n^{rsk} - \sum_{l \in I^n} C_n^{OP}(f_l^n) - C_n^{FX} \rightarrow \max \text{ for } \forall n \quad (1)$$

Subject to

$$f_l^n v_l^n \geq x_l^n = \sum_{rs} \sum_k x_k^{rs} \delta_l^{rsk}, \text{ for } \forall l \in I^n, \quad (2)$$

$$\mathbf{G}(f_l^n) \leq \mathbf{0}, \quad (3)$$

$$f_l^n \geq f_{l,LOW}, \text{ for } \forall l \in I^n, \quad (4)$$

$$x_k^{rs} = \arg \{ \min : \Gamma(x_k^{rs}) \}, \text{ for } \forall k \in K^{rs} \text{ and } rs \in \Omega. \quad (5)$$

ここで、 I^n はエアラインの運航するリンクの集合、 K^{rs} は rs OD市場で選択可能な経路の集合、 Ω はODペアの集合を表す。また δ_n^{rsk} は2値変数であり、 rs OD市場での経路 k がエアライン n を利用する場合1をとり、それ以外はゼロとなる。同様に δ_l^{rsk} も2値変数であり、 rs OD市場での経路 k がリンク l を利用する場合1をとり、それ以外はゼロとなる。

式(1)は目的関数であり、旅客収入、運航費用、固定費用で構成されることを表す。式(2)は路線の輸送能力制約であるが、下位問題である旅客の行動に容量制約付きの配分を仮定し、かつ容量が十分確

保されているバイパス経路を設定するのであれば、この制約はエアラインにとっては「直接意識なくともよい」制約となる。わが国の場合、バイパス経路としては鉄道経路を含めることが一般的である。

式(3)の $G(\cdot)$ は(2)に含まれない一般的な制約条件を表している。例えば、空港での容量制約はここに含まれるものとする。式(4)は運航の最低便数制約を表しており、乗り入れの停止を禁止したものである。式(5)は旅客フローが最適行動の結果であることを意味する。

(2) エアライン行動の均衡

ここではライバル企業の行動について情報が対称である場合について検討する。

Hong and Harker¹¹⁾, Zhouら¹²⁾に従うと、問題AMAXの形式は一般化Nash均衡問題として次のような準変分不等式問題(QVI)として定式化できることが知られている。経路交通量 x_k^{rs} のうちエアライン n が輸送する旅客数を改めて $x_{k^n}^{rs}$ と表すとすると、AMAXは次のように変形できる。

【エアラインの利潤最大化問題：AMAX-QVI】

$$\begin{aligned} & \text{Find } \mathbf{z} = (f_l^n, x_{k^n}^{rs}) \\ & \text{such that} \\ & \sum_{n, l^n} \left\{ \nabla_{f_l^n} \pi^n (\tilde{f}_l^n - f_l^n) + \nabla_{x_{k^n}^{rs}} \pi^n (\tilde{x}_{k^n}^{rs} - x_{k^n}^{rs}) \right\} \leq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

constraints (2) to (5) hold.

これは目的関数が \mathbf{z} に対して凸であるため、Zhouら¹²⁾が示すようなMethod of Successive Averages (MSA)などを利用して求解可能である。

なお、式(5)における混雑項（後述）の摂動の近似計算を容易にするために、最適化計算では式(6)の代わりに以下のような供給座席数 y_l^n による評価を行う。

$$\begin{aligned} & \text{Find } \mathbf{z} = (y_l^n, x_{k^n}^{rs}) \\ & \text{such that} \\ & \sum_{n, l^n} \left\{ \nabla_{y_l^n} \pi^n (\tilde{y}_l^n - y_l^n) + \nabla_{x_{k^n}^{rs}} \pi^n (\tilde{x}_{k^n}^{rs} - x_{k^n}^{rs}) \right\} \leq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

constraints (2) to (5) hold.

これは $y_l^n = f_l^n v_l^n$ という線型関係を満たしている限り式(6)と等価である。

(3) 旅客の行動

旅客行動の定式化はリンクの容量制約を明示的に

取り扱うため、Bell¹³⁾やZhouら¹²⁾の定式化に従うものとする。すなわち、確率的利用者均衡配分(SUE)を仮定するのであれば、リンクの混雑による追加的費用が容量制約に関するLagrange乗数の値として記述できる、というものである。

Bell¹²⁾の提案したリンク単位の不効用最小化問題は経路単位に書き直すことができる。その結果、旅客の不効用最小化を目的とした行動は以下のような最適化問題に帰着できる。

さて、旅客の利用経路選択に関わる不効用は以下のように示されるものとする。

$$u_k^{rs} = \theta \left(t^{rs} + \alpha_1 p^{rs} + \frac{\alpha_2}{f} + d^{rail} \right) \quad (8)$$

ここで d^{rail} は鉄道が利用される場合のダミー変数であり、 θ , α_1 , α_2 はパラメータである。式(8)は時間に関して正規化されたモデルである。

このような設定のもとで、旅客の最適化行動の結果得られる利用者均衡状態は、次のような最適化問題の解として得られる。

【容量制約つき確率的利用者均衡配分問題：SUE/FD-CAP】

$$\begin{aligned} \text{Object: } & \Gamma(x_k^{rs}) = \frac{1}{\theta} \sum_{rs \in \Omega} \sum_{k \in K^{rs}} x_k^{rs} (\ln x_k^{rs} - 1) + \sum_{rs \in \Omega} \sum_{k \in K^{rs}} u_k^{rs} x_k^{rs} \\ & \rightarrow \min \end{aligned} \quad (9)$$

Subject to

$$\sum_{k \in K^{rs}} x_k^{rs} = X^{rs}, \text{ for } \forall rs \in \Omega \quad (10)$$

$$x_l^n = \sum_{rs} \sum_k x_k^{rs} \delta_l^{rsk} \leq v_l^n f_l^n, \text{ for } \forall l^n \in I^n, \forall n \in N \quad (11)$$

$$x_k^{rs} \geq 0, \text{ for } \forall k \in K^{rs}, \forall rs \in \Omega \quad (12)$$

ここで u_k^{rs} は経路 k の不効用を示し、経路 k で使用するリンクのコスト u_l の結合で示される。本モデルでは u_l は所要時間 t_l 、運賃を含む旅行費用 p_l 、頻度の経済を表す $1/f_l^n$ 、そして満席の場合のコスト（混雑項） ϕ_l^n の線形結合で表されるものとする。また X^{rs} は rs OD市場でのOD交通量を表す。 v_l^n はリンク l^n での機材容量を表す。

式(10)はOD交通量の保存、式(11)はリンクでの容量制約、式(12)は制御変数の非負条件である。

求解法はBellのアルゴリズム¹²⁾を用いることができる。

(4) 求解アルゴリズム

本モデルにおいてAMAX-QVI は2層からなる多階層最適化問題である。ゆえにAMAX-QVI は本質的にはHong and Harker¹¹⁾やZhouら¹²⁾の構造と同じである。ただし、Zhouら¹²⁾のモデルに対応する解法では、設定された経路そのものの容量が十分確保されているという前提であり、制御変数の変化に対する制約条件(2)による影響はそもそも取り扱っていない。しかし、本稿で提案するモデルでは制御変数が容量に直接関係するため、制約条件(2)の影響を無視することができない。通常のMPECの解法に従えば、感度分析によりパラメトリック最適解を繰り返し求める形式になるので、非常に計算時間を必要とする。

しかし、国内航空旅客輸送市場に限って言えば、ほとんどの市場でバイパス経路が存在し、需要は弾力的に変化すると考えてよい。さらに容量が限界にきた路線を選択しない、という意味決定は旅客によって「自発的に」なされる。このことを考慮すれば、ボトルネック付き経路配分問題を下位問題に設定する限り、エアライン側は式(2)の制約を結果的に無視できることになる。ゆえに、情報が対象なエアラインを取り扱う限り、Zhouら¹²⁾のアルゴリズムを量的競争用書き換えることでほぼそのまま利用することができるのである。

3. 関西発着国内航空旅客輸送市場への適用

提案したモデルを実際の市場に適用し、市場の定性的分析を行う。

対象とする市場は関西発着の国内中・長距離旅客輸送市場である。特に平成18年2月に関西第3の空港として開港した神戸空港を加えて、関西3空港の機能分担の方向性を検討する。本分析で用いたデータは以下の通りである。

① 旅客

OD交通量に関しては総務省発行の「幹線旅客順流動調査」平成12年度版を用いた。これを対象年度にあわせて成長率を乗じて使用した。また、経路選択に関しては国土交通省航空局発行の「航空旅客動態調査」を、さらに運賃や旅行時間の情報収集に関しては「JTB時刻表」を用い、アクセスについては代表的交通手段1つのみについて取り出すように設定した。また、シミュレーションでは平成12年と現在データ収集可能な最新年度である平成18年での航空旅客数の成長を考慮し、鉄道移動も含めた全市場で平均成長率を

10%と設定した。これは年率に換算して約1.5%の上昇ということになる。

② エアライン

モデルの再現性に関しては、平成14年を対象とした。このためJAL、ANA、さらにJASの3社を対象とした。また、シナリオ分析ではJAL/JAS統合後の市場を対象とするため、JALおよびANAを対象とした。エアラインの輸送実績(統計値)、運航頻度(統計値)、機材情報(設定値:後述)に関しては国土交通省航空局発行の「航空統計年報」、および「数字で見る航空」を用いた。また、エアラインの運行費用に関しては、ICAO発行の「Financial Data」をもとに算定し、1シート・キロメートルあたりの平均運行費用として算出した。そしてこれを限界費用に等しいものとして採用した。また、モデルの設定上、ネットワークの形状変更はできないため、採算性の悪い路線からの撤退を表すことができない。このため、限りなく撤退に近い状態を表すために、最低運航頻度を設定した。これは任意の値であり、計算結果に影響を与えるものの、できるだけ小さな実数であれば、計算結果への影響を最小限とすることができることを数値実験の結果得た。ここでは週2便と設定し、計算を行った。投入機材は各路線での代表的な投入機材の平均供給座席数を設定し、入力とした。例えばB777:400席、B767:280席、B737:100席と設定した。また、各ODのバイパス経路として鉄道・船舶による経路を設定した。

(1) 再現性

前述のデータを用いてパラメータ推定を行った。ただし、旅行時間に関しては時間単位、金額に関しては1,000円単位、フライト頻度に関しては1日単位としている。

推定の結果、 $d^{rail} = -4.92$ (t値: -3.05)、 $\theta = -0.866$ (t値: -8.54)、 $\alpha_1 = 0.28$ (t値: 4.15)、 $\alpha_2 = 5.56$ (t値: 4.17) という推計結果を得た。これによる再現性は自由度修正済み決定係数で0.97であった。これらの値をもとにシミュレーションを行う。なお、再現性の検証には平成14年の市場を対象とした。

図-1は路線別旅客数の比較、図-2は路線別就航便数の比較である。平成12年のダイヤグラムの運行頻度を初期実行可能解として計算を行った。ただし、大阪空港発着路線に関しては、離発着数をJAL=90回/日、ANA=120回/日、JAS=50回/日とし、各社ともこの制約が有効となるように、現状の比率を維持しながら初期実行可能解を設定した。

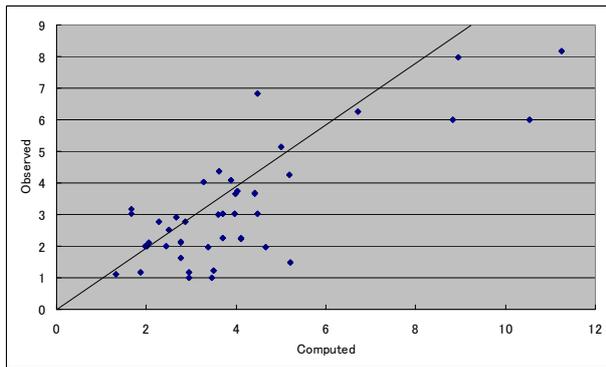


図-1 モデルの再現性：運航頻度（便/日）

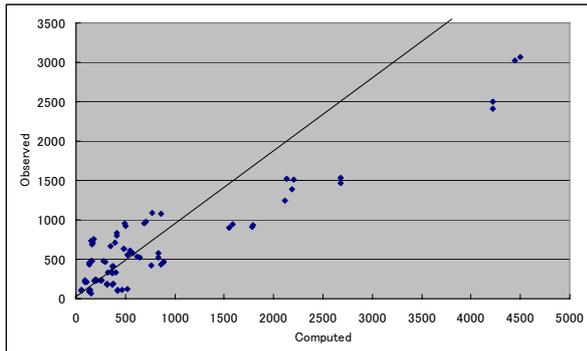


図-2 モデルの再現性：旅客数（人/日）

まず運航頻度に関しては全体として観測値と計算値の再現性に関しては自由度修正済み決定係数の値は0.64であり、全体の約50%の路線で過大に評価される傾向にある。特に羽田路線に関して大阪・関西双方からの路線が1.2～1.5倍程度に過大評価されることがわかった。羽田路線に関しては機材の平均がB-777クラスと設定されているため、B747よりも頻度の経済性が働きやすい傾向にある。このため、比較的高い運行頻度になったと考えられる。また離発着数はJAL=83.4回、ANA=118.8回、JAS=49.2回とJALで若干余裕があるものの、他の航空会社は制限一杯まで配便する結果を得た。また関西空港に比べて大阪空港の便数が過大に推計される傾向にある。例えば大阪-羽田路線では実数ではANAで年平均約8往復/日であるのに対し、計算結果では約11往復/日と約1.5倍の開きがある。対して関西-羽田は実数8往復/日に対して推計値9往復/日である。

次に1日あたりの旅客数（片道）の比較を図-2に示す。観測値と計算値の相関に関しては、自由度修正済み決定係数の値は0.85であるが、運行頻度と同じく羽田路線が1.2～1.5倍程度の過大評価となっている。

このような過大評価には次のような原因が考えられる。分析には時刻表に記載されたいわゆる「正規運賃」を使用している。しかし、旅客のパラメータ推計時に使用したデータ年次である平成12年時点で既に幅

運賃制が導入され、平成12年の航空法改正以降では各種割引運賃が存在し、正規運賃と比較して収益性が劣る場合が存在する。平成12年で採用した運賃の実勢からの格差が旅客の不効用のパラメータで運航頻度のウェイトを実際よりも過大に評価した可能性がある。ゆえに頻度の増加による不効用の減少に敏感になるようなバイアスが存在する可能性を否定できない。残念ながら現時点ではこの実勢価格に相当する価格情報を統計的に把握することは困難である。また、本稿では都道府県のセントロイドを県庁所在地にしたため、大阪空港の地理的条件を過大に評価したためであると考えられる。これはゾーニングを2次生活圏レベルなど詳細に分割すれば精度の向上を期待することができると考えられるが、配分対象経路が飛躍的に増加するため、実用時間内での計算は現在のところ困難である。また、モデル自体の特徴として、収益性を高めるためにできる限り高いロードファクターで運行する。このため、羽田路線など高収益の路線で80%を超えるなど、現実のロードファクターよりはるかに高い値となってしまう。一見すると、この問題は機材の設定を工夫することで解決可能であると考えられるが、こういった基準で機材を設定するのか、今後検討する必要がある。

旅客総数で見ると、平成12年度の数値に年成長率1.5%を乗じた値52,234人/日と比較して63,750人/日と総数では約22%過大に推計することがわかった。これは前述のように羽田路線に関する過大推計の傾向が影響していると考えられる。現段階ではこれ以上の精度向上を図ることは難しい。

このため、本分析では羽田路線などの繁忙路線の旅客数、ならびに大阪空港発着便数を過大に評価するという歪みを持つという点に注意し、以降の政策シミュレーションを行うこととする。

(2) 関西3空港におけるシェア

次に、本分析のベンチマークとなる神戸空港開港以降の関西3空港における旅客需要を推計する。ここでは神戸空港での路線に関しては、北海道路線は新千歳空港のみとし、その他に関しては平成18年10月時点でのダイヤグラムで設定されている路線を対象としている。ただし、ベンチマークとなる計算（Case 0とする）では、低費用航空会社（LCC）の参入は考慮していない。また、投入機材は実際の状況を考慮し、B737のみとした。空港での制約に関しては、大阪空港での離発着数は各社100回/日、神戸空港では各社30回/日としている。OD旅客数に関しては、平成12年度の総旅客数に対し、年率1.5%の増加率を設定し、与えること

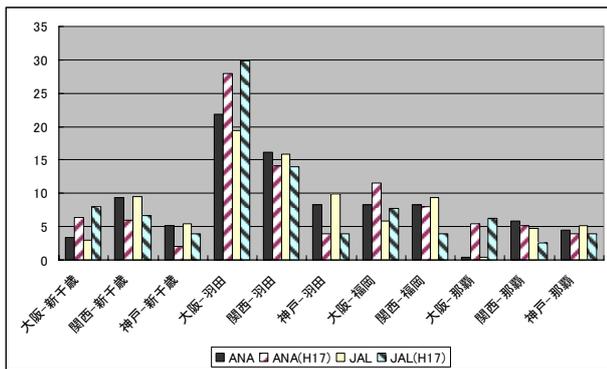


図-3 H18年推計：離発着数（回/日）

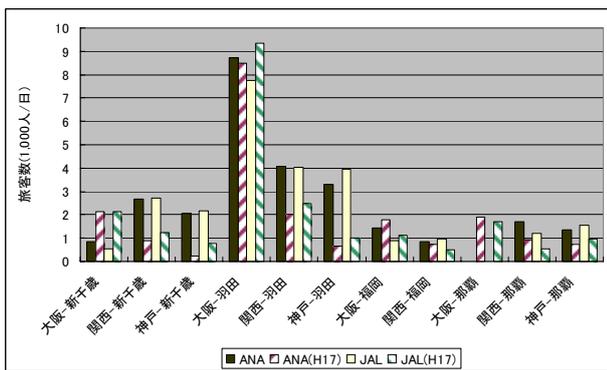


図-4 H18年推計：旅客数

とした。

図-3および4はベンチマーク（Case 0）における航空会社別離発着回数ならびに輸送旅客数を表している。簡単のため主要路線（羽田-大阪，羽田-関西，羽田-神戸，新千歳-大阪，新千歳-関西，福岡-大阪，福岡-関西，那覇-大阪，那覇-関西）に絞って記載している。

なお、参考値として平成17年航空統計年報での記載値（往復：ただし、神戸空港は3月期の実績のみ利用）も合わせて掲載している。ここでは平成14年ネットワークの場合と異なり、大阪空港での過小評価、関西空港での過大評価の傾向がある。特に、札幌、那覇路線といった長距離路線での大阪空港での過小評価が強く出ている。また、神戸空港に関しても過大に評価する傾向にある。ただし、羽田路線に関してはスカイマーク・エアラインズに割り当てられている14回/日も大手2社に割り当てられて計算されている。これらから計算される回数は平均10回/日であり、計算値との乖離は小さい。また現在運休となっている熊本路線などいくつかの路線での運航を最低運航頻度（片道）である週2便にまでの減便を許す形となっているため、不採算路線と判断された場合、大きく減便され、より採算性の高い羽田路線などに割り当てられたと考えら

れる。

さて、平成14年ネットワークでのモデルの結果をあわせると、モデルは大都市に近接する空港に関しては過大に推計する傾向にあるといえる。そして、神戸空港開港以降ではこの特性が神戸空港にも現れたといえる。ただし、大阪空港も同様の性質を有した空港であるため、その過大推計の傾向は抑制されている。こういった点を考慮すると、神戸空港に関してはやはり過大評価の傾向にあるものの、全体としては市場の特性自体は十分反映されているといえる。

次に、3空港のシェアについて見ていく。各空港での総離発着回数は大阪空港198.7回、関西空港91.5回、神戸空港55.5回である。大阪空港では回数制限一杯まで使われることがわかる。神戸空港では便数が現状規定されている日発着60回を4.5回程度下回っている。全発着回数に占める各空港の割合は大阪空港57.5%、関西空港26.5%、神戸空港16%であった。旅客に関しては、3空港利用者総数は63,205人/日となった。

一方、旅客のシェアは大阪空港45.6%、関西空港30.2%、神戸空港24.2%であった。これは、関西空港でのロードファクターが頻度の経済が働きやすい路線（羽田路線，新千歳路線）で非常に高くなるためである。

さて、関西3空港のうち、2空港は滑走路容量が厳しく制限された空港となっている。このため、これらの空港の制限が各空港のシェア、特に繁忙路線のシェアに多く影響しているものと考えられる。今後空港環境の制約が非常に厳しい大阪空港の滑走路容量制約（以降、容量制約と称す）がさらに厳しくなった場合、その機能はどのように補填すべきかを考えるために、大阪空港の容量制約に関する感度分析を実施した。このとき、大阪空港以外の旅客獲得能力を計測するため、神戸空港に関しても容量制約を緩和し、無制限とした。ただし、以下の計算では羽田、福岡といった混雑空港での発着枠制限はないものとして計算している。なお、大阪空港の容量制約に関しては200回/日の場合をCase 1、10%減の場合をCase 2とした。発着便数の推移を図-5に、旅客シェアの推移を図-6に示す。

図から、神戸空港での容量制約の緩和が仮に生じた場合、神戸空港のシェアが大幅に増加するということがわかる。これは全てのケースに共通する結果である。これは神戸空港就航機材を全てB737（100席/便）に統一しているため、頻度の経済が働きやすい条件となっていること、さらにはゾーニングを府県の県庁所在地をセントロイドとしたため、神戸空港が相対的に最も地理的条件が有利になったことなどがその原因である

と考えられる。図-7に主要路線ごとの就航便数比較を示す。

図-7では繁忙路線である羽田路線の需要が神戸空港に集中することがわかる。これは大阪空港と地理的にも近い神戸空港が大阪空港の代替空港として機能する可能性があることを示すものである。すなわち、モデルの特性上、繁忙路線では過大に推計する点、また羽田側には容量制約を設けていないということも考慮しても、神戸空港での容量制約が緩和されれば、需要を大きく伸ばす可能性があることを示すものである。一方、関西空港に関しては神戸空港の容量制約がなくなることにより、頻度が大きく減じるという結果となっている。また、総旅客数の点でも、大阪空港・神戸空港ともに容量制約が設定されている場合と比較して、Case-1では17.5%、Case-2では14%の増加を示している。次に、空港間の機能代替性の観点からこの結果を解釈することを試みる。現実には神戸空港の容量制約の解消は進入経路など上空の制約のため、必ずしも実現可能とはいえない。その場合、旅客の多くは関西空港に移転するものと考えられるが、関西空港でその全てをまかなうことは難しいと予想される。これはCase 0とCase 1を比較すれば把握可能である。すなわち、両ケースを比較すれば、神戸空港の容量制約の有無によって約11,000人/日の開きがあることがわかる。換言すると、神戸空港の容量制約のために、約11,000人/日が航空を利用できる機会を失っているといえる。

さらに、大阪空港の容量制約強化の影響を関西空港で全て吸収することも難しいと考えられる。このことを確認するために、神戸空港での容量制約下における大阪空港での容量制約強化の場合と比較する。表-1では大阪空港での容量制約10%下の条件の下で、神戸空港容量制約付きの場合（Case 3とする）と無制約の場合（Case 2）における離発着数・旅客数の比較を示したものである。神戸空港が旅客にとって有利な条件となっていることは前述の通りであり、その影響は神戸空港での容量制約が解除されれば神戸空港では約60回（30便）増便される結果からも理解される。一方、関西空港は神戸空港での容量制約が設定されることで約30回（15便）の増便を行うことになり、大阪・神戸を選択できない旅客が関西空港での需要を押し上げていると考えられる。

総旅客数の点からみれば、神戸空港での容量制約が有効な場合、62,106人であるが、容量制約が撤廃されると72,056人となった。すなわち、大阪空港での容量制約強化下では10,000人あまりの旅客を神戸空港での容量制約により失っていることになる。



図-5 ITM容量制約の影響：離発着数（回/日）



図-6 ITM容量制約の影響：旅客数（1,000人/日）

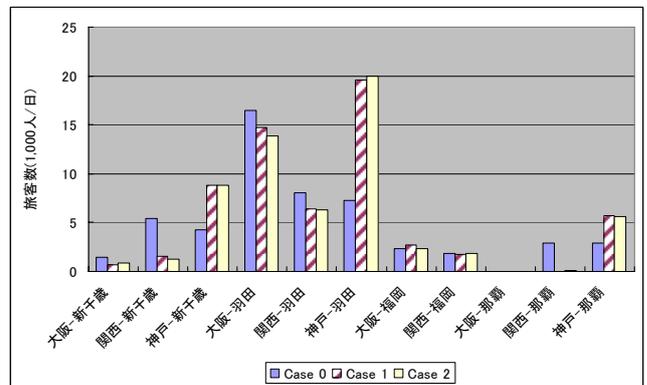


図-7 ITM容量制約の路線旅客数への影響

表-1 KOB容量制約の影響

		Case 2	Case 3
大阪	離発着数	175.6	180.0
	旅客	24186	26236
関西	離発着数	66.2	99.6
	旅客	10409	20230
神戸	離発着数	124.3	57.0
	旅客	37461	15640

さらに、Case 0と比較すれば1,099人/日だけ大阪空港容量制約強化によって需要が失われていることがわかる。換言すると、旅客の効用が神戸空港での容量制約の分だけ損なわれていることになる。

このように、大阪空港、神戸空港での容量制約による需要の低下を関西空港が現在の状態を維持する限り吸収できない可能性が高いといえる。

(3) 関西空港へのLCC参入の効果計測

最後に、大阪空港・神戸空港の容量制約下において、関西空港利用旅客の便益向上の方法の一つとして、LCC参入の効果を検討する。これをCase 4とする。LCCの運賃や運行費用に関しては、わが国ではスカイマーク・エアラインズなど既存企業があるものの、実勢を把握することが困難であるため、欧米における一般的なLCCの割引状況を考慮し、運賃、運行費用双方において30%低く設定した条件下で計算を行っている。また、就航路線は繁忙路線である、新千歳、羽田、福岡路線に限定する。これはLCCの参入の多くは繁忙路線に限定されたものであると観測されることが多いためである。また、以下の計算でも羽田、福岡といった混雑空港での発着枠制限はないものとして計算している。ゆえに現行と比較して、LCCの参入が大規模に実施可能な場合を想定して数値計算を行っている。結果を表-2に示す。

表から、関西空港へのLCCへの参入に関して、繁忙路線への参入が自由に行うことができるという条件下では、関西空港での利用者数・発着回数が増加するだけでなく、神戸空港での利用者数・便数の増加が生じるという結果を得た。これはLCC参入による競争が活発になった結果であると考えられる。ただし、LCCの市場でのシェアはそれほど大きいものではなく、関西空港発着の旅客数に対して6.9%、発着便数に関しては13.4%を占めるにとどまる。これに対し、神戸空港では旅客数に関して5.4%伸張することがわかる。繁忙路線へのLCC参入で既存キャリアが繁忙路線の運行頻度を増加させたためである。例えば、神戸空港発着の既存航空会社の羽田路線発着回数の合計はCase 0では18.0回であったのが、Case 4では19.8回と1.8回の増加となる。一方、大阪空港では400人程度の利用者数減少が生じている。

これはLCCとの路線競合により、旅客が関西空港や神戸空港にシフトした結果であると考えられる。総旅客数の点では63,205人から64,888人と1,600人あまりの増加という結果を得た。

表-2 KIXへのLCC参入の影響

		Case 0	Case 4
大阪	離発着数	198.7	198.7
	旅客	28,807	28,453
関西	離発着数	91.5	104.5
	旅客	19,086	20,288
神戸	離発着数	55.5	57.1
	旅客	15,313	16,147

旅客数の増加はLCCの参入により便数の増加から混雑の低下を生み、結果として全体の不効用が減少したためであると考えられる。神戸空港での容量制約なしのケース (Case 1) と比較すれば、潜在需要の約16%がLCCの参入により賄われると考えられる。

また、エアラインの収益性の変化については次のような結果を得た。ベンチマーク (Case 0) での大手2社の収益を100とした場合、1社は105となり、もう1社は96という結果を得た。このとき、LCCの収益は計算上ほぼゼロの値を取る結果となった。このことから、繁忙路線へのLCC参入による大手2社への収益的な影響は非対称であるものの、そのインパクトは大きくないといえる。一方、LCCに関しては今回の設定に限ってはであるが収益性の点では好ましいとはいえず、参入を促すためには何らかのインセンティブを与えることが必要であると考えられる。

このように、繁忙路線でのLCCの乗り入れ制約がないという限定的な条件下ではあるが、大阪空港、神戸空港での容量制約が行われている場合、LCCの関西空港への参入は旅客の便益を向上させるという点では有効であると考えられる。

5. おわりに

本稿ではBi-Level型ネットワーク均衡モデルを関西発着の国内航空旅客輸送市場に適用し、関西3空港での需要の分担特性を把握した。

数値計算から、まずモデルの再現性については、相関係数から判断すれば、モデル全体の制度はおおむね良好といえるが、総需要に関しては20%程度の過大推計の傾向があり、また個々の路線での旅客需要ならびに運航頻度に関しても繁忙路線に関しては過大に推計する傾向にあることがわかった。結果として、再現精度に関しては今後改善の余地があることが示された。次に3空港間での構造的関係については、大阪空港での容量制約が強化されることにより、関西空港の需要は増加するものの、これには神戸空港での容量制約が

大きく影響している可能性があることが示唆された。また、旅客の総需要も神戸空港での容量制約が設定され、また関西空港での路線サービス内容が現行と同じであれば、全体の需要は神戸空港での容量制約緩和時と比較して小さくなることが指摘された。最後に関西空港へのLCCの参入は、羽田・福岡空港での混雑が解消され、かつ繁忙路線への自由な参入を行うことができるという条件下では、現行と比較して総旅客数を増加させるという点で有効であり、大阪・神戸空港での容量制約による影響を減殺することが期待できることを指摘した。

本稿では関西発着の国内航空旅客輸送市場に限定した分析を行ったが、分析手法そのものは国内全域、あるいは国際輸送市場でも適用可能である。

【謝辞】

本研究を進める上で、神戸大学大学院経営学研究科村上英樹准教授ならびに関西空港・航空研究会メンバーの方々には研究に関わる討議などで有意義なご指摘をいただきました。また神戸大学大学院自然科学研究科修士課程 下山彰宏氏にはデータの基礎分析および統計処理において協力をいただきました。この場を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 竹林幹雄：ローコストキャリアの行動を考慮した航空旅客輸送市場のモデル化，土木計画学研究論文集No.22, 609-616, 2005.
- 2) Takebayashi, M. and K. Kuroda.: Multiple Airport System and Management Policy: Case of Osaka Metropolitan Area, ATRS2006 (CD-ROM).
- 3) Kanafani, A. and A. Ghobrial: Airline hubbing: some implications for airport economics, *Transportation Research, A*, vol.19, No.1, 15-27, 1985.
- 4) Dobson, G. and P. J. Lederer: Airline scheduling and

routing in a hub-and-spoke system, *Transportation Science* Vol. 27, No. 3, 281-297, 1993.

- 5) Adler, N: Competition in a deregulated air transportation market, *European Journal of Operational Research*, 129, 337-345, 2001.
- 6) Hsu, C.I. and Y.H. Wen: Determining flight frequencies on an airline network with demand-supply interactions, *Transportation Research part E*, 39, 417-441, 2003.
- 7) Furuichi, M. and F.S. Koppelman: An analysis of air travelers' departure airport and destination choice behavior, *Transportation Research A* 28 (3), 187-195, 1994.
- 8) 大橋忠宏, 宅間文夫, 土谷和之, 山口勝弘, 堀健一：ネットワークを考慮した航空旅客市場での空港拡張の効果：羽田空港を例として，土木学会論文集, No. 772/IV-65, 131-142, 2004.
- 9) 竹林幹雄, 黒田勝彦, 鈴木秀彦, 宮内敏昌：完全競争市場として見た国際航空旅客輸送市場のモデル分析，土木学会論文集, No. 674/IV-51, 35-48, 2001.
- 10) Brander, J. and A. Zhang: Dynamic Oligopoly in the Airline Industry, *International Journal of Industry Organization* 11, 407-435, 1993.
- 11) Hong, S. and P.T. Harker: Air traffic network equilibrium: toward frequency, price and slot priority analysis, *Transportation Research* 26B, No. 4, 307-323, 1992.
- 12) Zhou, J., W.H.K. Lam, and B. Heydecker: The generalized Nash equilibrium model for oligopolistic transit market with elastic demand, *Transportation Research* 39B, 519-544, 2005.
- 13) Bell, M.: Stochastic User Equilibrium Assignment in Networks in Queues, *Transportation Research* 29B: 125-137, 1995.

ネットワーク均衡分析による関西3空港における機能分担に関する考察*

竹林幹雄**・黒田勝彦***

本稿では関西発着国内航空旅客輸送市場を対象として、Bi-Level型航空旅客輸送市場モデルを適用し、関西3空港の需要構造の特徴について検討した。まず平成14年の市場を対象として、モデルの再現精度を評価した結果、航空旅客数に関しての精度は高いものの、運航頻度に関して過大に推計する傾向があることがわかった。次にモデルを用いた定性分析では、大阪空港での容量制約が強化された場合、関西空港への旅客のシフトが生じるが、神戸空港での容量制約が緩和されれば、神戸空港に旅客のシフトが生じることがわかった。

A Study on Multiple Airport System in Osaka Metropolitan Area: Network Equilibrium Model Approach *

Mikio TAKEBAYASHI ** and Katsuhiko KURODA ***

This paper aims to analyze the characteristics of domestic air transport market relating to Osaka Metropolitan Area by applying the Bi-Level market model. First, we evaluate the model accuracy with 2002 data. The results show that the model duplicates the PAX flow well but service frequencies are over-estimated. Second, we examine the scenario studies in order to understand the structural relationship among three airports. The results show that the strict capacity constraint of ITM leads to the demand shift to KIX but the demand will shift to KOB when KOB has more capacity.
