

シームレス・アジア時代における空港のゲートウェイ機能評価のための分析手法
 A Method of Analysis for Evaluating Gateway Function of Airports in Deregulated Asian Air
 Transport Markets

竹林幹雄，津田俊介

by Mikio TAKEBAYASHI and Shunsuke TSUDA

1. はじめに

本稿ではエアラインの利潤最大化問題によって記述される寡占競争と旅客の最適路線選択行動との相互作用を考慮した Bi-Level 型航空旅客輸送モデルを，東アジアを中心とした国際航空旅客輸送市場に適用可能な形式に変更し，わが国主要国際空港の国際的な競争力を把握する．

2. モデル

本稿で使用するモデルは Takebayashi¹⁾ が提案した Bi-level 型ネットワーク均衡モデルを基本とする．これは上部・下部の 2 層構造の市場モデルであり，上部には供給者モデルであるエアラインの競争均衡と，下部構造では旅客の経路選択行動を取り扱う均衡配分によって構成されている．

ただし，国際旅客輸送市場を取り扱うにあたり，いくつかの点でモデルの調整を行う必要がある．ここでは，モデルの変更点を含め，モデルの構造を示すこととする．

(1) 旅客の行動

ベースモデル¹⁾では旅客行動に関しては Bell²⁾ の提案する容量制約付き確率的利用者均衡状態を仮定する．今，OD 市場 rs で経路 k を選択する旅客数 x_k^{rs} は確率的利用者均衡状態が成立した結果として求められるものと仮定する．彼らは経路 k を運営するエアライン n が経路に含まれるリンク l^n で提示する頻度 f_{l^n} で構成される利便性指標 $1/f_{l^n}$ (「頻度の経済性」を表すものと考えられる) とラインホール時間，さらにアクセス・イグレスに要する時間を経路選択時に考慮すると仮定する．すなわち，これらの時間を合成した rs 市場の経路

Keywords: 航空旅客輸送市場，寡占市場

*: 正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

** : 正会員 NTT西日本

k での移動時間を t_k^{rs} とする．なお，本稿における計算では移動に関する費用に関しては，出発空港を考慮しないこと，ならびに後述する IATA 価格を採用しているため，パラメータ推計を行うことができないため，定式化からは除外している．また頻度の経済性はリンクにおける輸送頻度の合成で表すことができると考える．

さらにモデルでは旅客は満席の場合はその路線を使用できないことをコスト化して自己の行動に反映させるものとする¹⁾．ここでは利用するリンクの混雑に起因するコストを混雑項 ϕ_{l^n} として考える．

分散パラメータを θ ，回帰パラメータを α として時間に関して正規化した式(1)を旅客の不効用 u_k^{rs} とする．

$$u_k^{rs} = \theta \left(t_k^{rs} + \sum_l \left(\alpha \frac{1}{f_{l^n}} + \phi_{l^n} \right) \delta_{l^n}^{rs,k} \right) \quad (1)$$

ここで $\delta_{l^n}^{rs,k}$ は 2 値変数であり rs OD 市場での経路 k が n 社が運航するリンク l^n を利用する場合 1 をとり，それ以外はゼロとなる．右辺第 2 項は運行頻度に関わる不効用を表し，空港での平均待ち時間に相当するものである．

さて，Bell²⁾ 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．

【容量制約つき確率的利用者均衡配分問題：SUE/FD-CAP】

$$\text{Object : } \Gamma(x_k^{rs}) = \frac{1}{\theta} \sum_{rs \in \Omega} \sum_{k \in K^{rs}} x_k^{rs} (\ln x_k^{rs} - 1) + \sum_{rs \in \Omega} \sum_{k \in K^{rs}} u_k^{rs} x_k^{rs} \rightarrow \min \quad (2)$$

Subject to

$$\sum_{k \in K^{rs}} x_k^{rs} = X^{rs}, \text{ for } \forall rs \in \Omega \quad (3)$$

$$x_{l^n} = \sum_{rs} \sum_k x_k^{rs} \delta_n^{rsk} \leq v_{l^n} f_{l^n}, \text{ for } \forall l^n \in I^n, \forall n \in N \quad (4)$$

$$x_k^{rs} \geq 0, \text{ for } \forall k \in K^{rs}, \forall rs \in \Omega \quad (5)$$

$$\mathbf{G}(f_{l^n}) \leq \mathbf{0}, \quad (7)$$

$$f_{l^n} \geq f_{LOW}, \text{ for } \forall l \in I^n, \quad (8)$$

ここで 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 で投入される機材の平均座席数(機材容量)を表す。

式(3)はOD交通量の保存, 式(4)はリンクでの容量制約, 式(5)は制御変数の非負条件である。

(2) エアラインの行動

ベースモデル¹⁾ではエアラインは自己の利潤を極大化するために, 供給座席数を制御すると考える。ただし, 直接供給座席を制御するのではなく, 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ととする。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。ただし, 本稿では運賃に関して以下のような変更を加えている。すなわち運賃に関しては国際輸送市場を対象とするため, 運賃設定は必ずしも競争的な価格であると見なすことはできない。従って, 本稿では運賃をIATAの設定するゾーン運賃による規制運賃の存在を前提に外生的に与えることとする。換言すると, 規制価格をもとに最適輸送量を決定する市場を本研究では仮定することとなる。

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, すなわち問題[SUE/FD-CAP]の解として与えられるものとする。OD市場で設定される運賃 q_k^{rs} はODペアごとに与えら, 経路による差異はないものとする。一方, エアラインはフライトごとの運航費用 $C_n^{OP}(f_{l^n})$ 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¹⁾。

【エアラインの利潤最大化問題: AMAX】

$$\text{Object} : \pi^n(f_{l^n \in I^n}, \tilde{f}_{l^{-n} \in I^{-n}}) = \sum_{rs} \sum_k q_k^{rs} x_k^{rs} \delta_n^{rsk} - \sum_{l \in I^n} C_n^{OP}(f_{l^n}) \rightarrow \max \text{ for } \forall n \quad (6)$$

Subject to

$$x_{l^n} = \sum_{rs} \sum_k x_k^{rs} \delta_n^{rsk} \leq v_{l^n} f_{l^n}, \text{ for } \forall l^n \in I^n, \quad (4')$$

$$x_k^{rs} = \arg\{\min : \Gamma(x_k^{rs})\}, \text{ for } \forall k \in K^{rs} \text{ and } rs \in \Omega. \quad (9)$$

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} はバイナリ変数であり, 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。

式(6)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(4')は路線の輸送能力制約であり, 下位問題である旅客の行動[SUE/FD-CAP]と同意であるが, エアライン n ごとにこの制約が存在するため, $\forall n \in N$ という条件は省略される。ただし, 問題AMAXに関して, 旅客行動に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考慮する必要のない制約となる。

式(7)の $\mathbf{G}(\cdot)$ 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, 乗り入れを停止することを禁止したものである。式(9)は旅客フローが最適行動[SUE/FD-CAP]の結果であることを意味する。

3. データおよびモデルの再現性

ここでは 2003 年の国際航空旅客輸送市場を対象として, モデルの説明力を評価するとともに, わが国主要空港の国際競争力を評価するためのシナリオ分析について述べる。

(1) OD 市場と空港

表-1 は対象とする OD 市場および各 OD ゾーンからアクセス可能な空港の一覧である。OD 交通量の算定は各国の統計, ならびに世界観光機構 (World Tourism Organization/WTO) 編集の世界観光統計資料集の値をもとに算定した。ただし, 近接エリアへの OD 交通量はゼロとしている。ま

た紙面の都合上、OD 表の掲載は省略する。

なお、端点となる北米、欧州、オセアニアについては、流動量の大きさを考慮し、北米はロサンゼルス (LAX)、欧州はロンドン (LHR)、オセアニアはシドニー (SYD) 空港の位置を採用している。

表-1 ODゾーンおよび空港一覧

エリア	ODゾーン名	空港
日本	東日本・首都圏	成田(NRT)/
	中部・東海・北	中部(NAG)
	陸	関西(KIX)
	近畿・西日本	
韓国	韓国	インチョン(ICN)
中国	華北・北京	北京(PEK)
	華中・上海	上海(SHA)
	華南・広州	広州(GAZ)
香港	香港	香港(HKG)
台湾	台湾	台北(TPE)
フィリピン	フィリピン	マニラ(MNL)
タイ	タイ	バンコク(BKK)
インドネシア	インドネシア	ジャカルタ(JKT)
マレーシア	マレーシア	クアラルンプール(KUL)
シンガポール	シンガポール	シンガポール()
北米	北米	北米
欧州	欧州	欧州
オセアニア	オセアニア	オセアニア

(2) エアラインの費用関数

本稿では、エアラインの運航費用算出にあたり、限界費用一定を仮定した。そして、限界費用の算出方法を Brader and Zhang の方法に依った。これはエアラインの提出する財務報告から直接計算できるものであり、データが完備していれば非常

に簡便に利用できる、標準的な方法である。本稿では、ICAO の Financial Data に記載された値をもとに運行費用を推計することとした。なお、アライアンスに属するエアラインは複数存在し、同一市場（空港間）でも異なる運行費用として算定される。このため、同一市場ではアライアンスに属するエアラインは、限界費用を平均したものをを用いることとした。エアライン n のリンク l^n での限界費用の計算式は以下の形式で与えられる。

$$mc_{l^n}^n = cpm^n (d_{l^n} / AFL^n)^{-\eta} \cdot d_{l^n} \quad (9)$$

ここではエアライン n の単位有効座席キロあたりの輸送費用であり、 l^n はリンク l^n の輸送距離である。また AFL^n はエアライン n が運行するリンクの平均長である。また η は拡大パラメータであり、通常 0.5 を用いることから、本稿でも 0.5 として計算を行った。

(3) 旅客行動のパラメータ推計結果

旅客パラメータの推計では、日本での調査による値を用いることとした。これは国・地域によって旅客の属性は異なると考えられるが、旅客の路線選択を分析するに足る精度を持ったデータが米国を除いては日本でしか採られていないこと、JATA ならびに ICAO ではアジア - 欧州などゾーン間移動が概略的に示される (WATS などに記載) か、あるいは乗降地間のフローのみを整理したものの (Origin and Destination に記載) であるため、路線選択としての分析に使用できないこと、という 2 点を考慮したためである。平成 15 年度国際航空旅客動態調査を用いてパラメータの推計を行った。結果として $\beta = -0.244$ (t 値: -32.7), $\gamma = -0.881$ (t 値: -5.12) を得た。符号条件も整合し、各パラメータの t 値は十分説明力があることを示している。

(4) モデル全体の再現性

エアラインの最適行動も加えたフルモデルでの再現性について検討する。ここでは OD 市場でのシェアの分析に加えて、エアラインの頻度の再

現性を評価する。パイパスの不効用については複数のパターンを組み、試行錯誤的に試験した結果、アジア域内では 10、欧州・北米方面に対しては 25 という閾値を設ける場合が最も高い再現性を有した。以降、このパラメータのもとで計算を行うこととする。なお、路線の運行頻度に関しては ICAO の Traffic by Flight Stage のオンライン版に採録されている最新のデータである 2003 年時点での運行頻度を初期値として計算を実施している。また、滑走路容量に関しては、制約の厳しい首都圏（NRT）のみで考慮することとした。首都圏での滑走路容量の割り当ては、2003 年時点での実績に基づき、NRT での最大離発着回数に各アライアンスの使用割合を乗じた値を割り当て離発着回数とした。ただし、実際にはアライアンスに属さないエアラインの使用枠が存在する。計算に使用する割当数はこの分も全て考察対象とするアライアンスに割り当てられるため、実数よりも過大な値として与えられることに注意が必要である。本稿では、Star Alliance に対しては 70 回、One World に対しては 20 回、Skyteam には 42 回、JAL に対しては 62 回と設定した。

まず、旅客総数に関しては観測値が 141637 人/日であるのに対し、156911 人/日という結果となった。これは約 10%の過大推計となっている。アライアンスごとの再現性をシェアおよび決定係数（ R^2 ）で評価すると、表-2 のようになる。

表-2 旅客フロー再現性（シェアおよび決定係数）

アライアンス	Star	One	Sky	JAL
シェア (%)	46.7/46.8	26.9/25.8	16.9/15.9	9.6/11.4
R^2	0.330	0.333	0.264	0.368

注意：シェアの左の値は計算値、右の値は観測値を表す。

決定係数の点からみると、必ずしも高い再現性を得ていると判断することはできない。特に Skyteam に関しては決定係数が 0.264 と最も悪く、過大評価の傾向にあることがわかった。一方、JAL

に関しては過小評価の傾向にある路線が多いとすることがわかった。これは頻度に比較的敏感に反応するパラメータとなっているため、就航数が多いアライアンスほど旅客選択確率が高くなり、これがさらに便数を増加させ、乖離を生じさせたと考えられる。また、運行費用をアライアンスの平均としているため、路線によっては過大・過小に評価している可能性がある。

次に路線ごとの再現性を検討する。輸送頻度に関する相関分析の結果、決定係数はそれぞれ 0.504（Star Alliance）、0.810（One World）、0.111（Skyteam）、0.530（JAL）を得た。旅客のリンクフローと比較して大幅に再現性が高いことがわかる。旅客フロー同様に Skyteam の路線に対する再現性が相対的に低いのは、やはりアジアへの就航便数が少ない Skyteam の路線を過小に評価したためであると考えられる。

以上のように、輸送頻度の再現性は比較的高く、また旅客フローに対する精度もシェアに関してはある程度確保できているため、この再現性をもとに以後のシナリオ分析を行うものとする。

4. シナリオスタディ

3. で示したモデルならびにパラメータを用いて、中国発着 OD 増加による市場への影響、北京・上海への乗り入れ路線増強によるゲートウェイ機能の移動について数値計算を行った。なお、紙面の都合上、計算結果の詳細は講演時に示すこととする。

参考文献

- 1) Takebayashi, M. and Kuroda, K.: Multiple Airport System and Management Policy: Case of Osaka Metropolitan Area, ATRS2006 (CD-ROM).
- 2) Bell, M.: Stochastic User Equilibrium Assignment in Networks in Queues, Transportation Research 29B: 125-137, 1995.