

東アジア航空ネットワークにおける国際航空旅客流動分析のためのモデル開発*

A Practical Modeling of International Air Passenger Flow in the East Asia*

石倉智樹**

By Tomoki ISHIKURA**

1. はじめに

近年における経済・社会活動のグローバル化・ボーダーレス化の進展, アジア諸国等の経済発展によって, 東アジアにおける国際間の交流が活発化し, 国際航空旅客がますます増大することが期待される。

国際航空輸送における運航権規制の観点から近年の流れを俯瞰すると, 欧州では, 1997年のパッケージⅢの規制緩和により, カボタージュを含む域内航空輸送が自由化され, 航空市場統一が実行に移された。オーストラリアとニュージーランドの間でも2002年の自由航空協定を経て航空市場統一が実現した¹⁾²⁾³⁾。このように, 国際航空における運航権決定形態の潮流は, バミューダ協定以来の二国間協定から, 航空市場統合や多国間協定へと移行しつつある。現時点においては, アジア域内の国間では, 欧米ほど自由化が進展しておらず二国間の航空協定が主流である。しかし, こうした航空自由化への動きは, 今後も継続していくと考えられる。

また, 航空路線ネットワークについても, 米国国内や欧州の市場では, ローコストキャリアの台頭により二地点間輸送の形態が拡大し, ハブアンドスポックス全盛の時代から大きな変化が生じている。航空規制と同様にアジア域内では, ローコストキャリアの勢力拡大が欧米ほど進んでいないが, 運航規制や空港容量制約という問題が解消されるにつれて, 欧米ビジネスモデルの模倣が行われていくことの可能性は否定できない。

このように, 近年では我が国を取り巻く東アジアにおける航空ネットワークに大きな変化を迎えつつある。かつ, 我が国の航空政策とは独立にもたらされる外生的な状況変化が想定される。こうした状況変化は国際旅客流動パターンに影響を及ぼすため, 航空政策検討においてこれを視野に入れる必要がある。

そこで本研究は, 政策決定支援ツールの一つとして, 航空ネットワークにおける需要を推定するモデルを構築した。本手法は, 東アジアの国際航空ネットワークを対象に, ネットワーク条件を外生とした旅客流動配分モデ

ルとして構築した。さらに, 仮想的な将来シナリオとして, 中国のOD需要増加シナリオと東アジア域内における機材小型化などのいくつかのシナリオを設定し, シミュレーション分析を行った。

2. 航空ネットワークの需要分析に関する既存研究

航空旅客の経路選択行動を扱った研究としては, 米国国内航空旅客を対象としたKanafani and Ghobrial⁴⁾の手法が先駆的業績である。それ以降の航空旅客需要分析においては, Harveyによるサンフランシスコ地域の空港選択の分析⁵⁾に代表されるように, nested logit modelが最も一般的手法として採用されている。

我が国における航空需要予測手法・分析手法についても, 国内航空・国際航空を問わず, 機関や経路の「選択」として捉える方法が主流であり, 多段階のnested logit modelによる需要モデル⁶⁾⁷⁾⁸⁾へと発展が進んでいる。

このように, 航空需要を扱った研究は多くの実績があるが, 対象を東アジア圏域における国際航空ネットワークとする研究に限定すれば, まず屋井ら⁹⁾による, ネットワークの特性および国際航空旅客の選好特性分析, 航空サービス整備効果評価が挙げられる。屋井ら⁹⁾は, ネットワークにおける旅客行動をlogit modelにより分析・評価しており, このためログサム値を利用して利用者便益の推計も可能となっている。

logit modelのように経路(パス)を明示的に扱う選択モデルでは, 全ての利用可能経路に対してサービスレベル変数を用意する必要がある。しかし, 対象とするネットワーク規模が拡大すると, 分析に必要なサービスレベルデータの量が膨大となり, データ作成やデータ更新に要する労力が増大し, 実務的なデメリットがある。

これに対し, 竹林ら⁹⁾は, 旅客とエアラインの関係をNash均衡と見なし国際航空旅客市場をモデル化しており, 旅客の経路選択行動は利用者均衡配分により表現されている。同様の考え方は家田ら¹⁰⁾も適用している。このように, 旅客の経路選択を, 利用可能経路を列挙しないネットワーク配分問題として捉えれば, 経路決定に関わる要因を全てリンク特性に帰着させて扱うことができる。このため, 全経路についてのデータを用意する必要がなくなり, 巨大なネットワークを対象とする場合やネットワーク自体が変化する場合の旅客流動分析が, 簡

*キーワード: 空港計画, 航空旅客流動, 東アジア, ネットワーク

**正員, 博(情報科学), 国土技術政策総合研究所
(横須賀市長瀬 3-1-1, TEL: 046-844-5032,
E-mail: ishihura-t92y2@ysk.nilim.go.jp)

易なデータ変更によって可能となる。したがって、分析の対象となるネットワーク形状シナリオが多い場合には、データ作成の面で省力化されるという長所がある。

本研究は、東アジア地域における航空路線ネットワークにおける細部までの旅客流動分析ツール開発を目的とするため、広大なネットワークを対象としていると言える。(後述するように、本研究の対象ネットワークはODペア数が679、総リンク数が3000本以上であるため、全ての利用可能経路毎に、サービスレベルデータを用意するには大きな負担が生じる。)そこで、本研究においてもネットワーク配分モデルのアプローチを利用して旅客流動を分析することとする。配分手法のコンセプトは、従来手法と同様であるが、本研究では、東アジアにおける国際および国内の双方を含む大規模な航空ネットワークを対象としていること、および、これまで検証されることが少なかった、種々の状況変化シナリオに対するシミュレーション分析を行っていることに特徴がある。

ただし、本研究は、航空政策変化やエアラインの路線戦略の変化に応じて国際航空旅客流動がどのように反応するかの分析を目的としており、航空会社の行動は本研究の範囲外として外生的に扱う。

3. ネットワークモデル

(1) モデルにおけるネットワークの概念

一般的な交通ネットワーク配分モデルを航空輸送ネットワークにおけるモデルへと拡張するためには、航空輸送の特性を反映する改良が必要となる。特に、ネットワークの定義が最も重要な課題となる。本モデルにおいては、航空輸送ネットワークを、以下のようなノードとリンクから構成されるネットワークとして表現する。

ノードについては、以下の4属性ノードを定義する。

1. Departureノード：空港から出発（離陸）する際の発地
2. Arrivalノード：空港に到着（着陸）する際の着地
3. Originノード：トリップが発生するノード
4. Destinationノード：トリップが吸収されるノード

リンクについては、以下の3属性リンクを定義する。

1. Flightリンク：航空輸送を表すリンク
2. Transitリンク：空港におけるトランジットを表すリンク
3. GenerationおよびConcentrationリンク：セントロイド（OriginおよびDestinationノード）と空港との間のトリップを表すリンク

以上のネットワーク構成の概念を図-1に示す。図-1は、空港における旅客フローを中心として示している。

航空旅客の流動は、ネットワーク上のリンクを流れるフローとして表される。任意の地点間のOD旅客流動は、OriginノードからDestinationノードへの総フローとして定義される。都市間直行フライトによる旅客流動は、Originノード→(Generationリンク)→Departureノード→

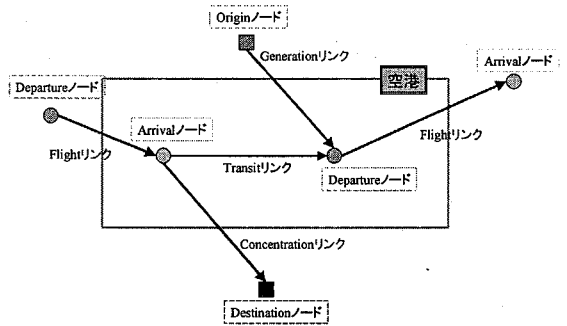


図-1 モデルにおけるネットワークの概念

(Flightリンク)→Arrivalノード→(Concentrationリンク)→Destinationノードというパスフローとなる。途中でトランジットを行う旅客流動は、1回のトランジットの場合を例とすると、Originノード→(Generationリンク)→Departureノード1→(Flightリンク1)→Arrivalノード1→(Transitリンク)→Departureノード2→(Flightリンク2)→Arrivalノード2→(Concentrationリンク)→Destinationノード、のようなパスフローとして表される。

このような簡略化は現実的なネットワークを精緻に再現するものではないが、巨視的なシナリオ・政策分析においては、簡便に効果を予測することが可能という利点を持つ。

本研究では、与件の航空ネットワークにおける旅客流動を、需要固定型利用者均衡 (UEFD) 問題として捉え、旅客流動の分析を行う。通常、道路交通ネットワーク配分モデルにおいては、リンク通過所要時間がリンクコストとして見なされる。すなわち、ある交通容量を持つ道路において交通量が増加すると、混雑によって所要時間が増加するが、それがリンクコストの変化となる。したがって、交通流パターンに依存して各リンクにおけるリンクコストが変化するため、その結果として任意のOD間移動における最短経路（最小コスト経路）も変化する。

本研究のモデルにおいても一般的なUEFD問題と同様に、旅客流動は、以下の最適化問題の解として得ることができる。

$$\min_{h^a} TC = \sum_{a \in A} \int_0^{q_a} C_a(x) dx \quad (1)$$

subject to

$$H_{ij} = \sum_{k \in K} h_{kij} \quad (2)$$

$$q_a = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \delta_{akij} h_{ij}^k \quad (3)$$

$$h_{kj} \geq 0 \quad (4)$$

$$q_a \geq 0 \quad (5)$$

C_a : リンク a のリンクコスト関数

h_{kj} : ODペア ij 間のOD交通量のうち経路 k を通過するフロー

δ_{akj} : クロネッカーのデルタ (リンク a がODペア ij の経路 k に含まれるとき1, そうでないとき0をとる)

q_a : リンク a のリンクフロー

H_{ij} : ODペア ij 間のOD交通量

(2)リンクコスト関数の定義

ネットワークモデル化において、ネットワーク構成の定義と同様に、リンクコストの定義も重要である。本研究では、国際航空輸送の所要時間をリンクコスト指標と見なしてモデル化を行う。

航空旅客が旅行経路を選択する際には、時間指標だけではなく、運賃などの金銭的費用も重要な要因と考えられる。しかし、本研究では、①通常の国際航空運賃は経路(path)毎に設定されており、リンク(フライト)毎の運賃を特定し推定することが困難、②エアラインのイールド等集計データからキロあたり運賃推定を行うと、実質的には時間指標を用いること等価、等の理由から、金銭費用については考慮しないこととした。この点については、モデル発展のための今後の課題である。

①の課題については、選択肢集合を定義したlogitモデルのように、pathを列挙する配分手法を用いることで対応することができる。しかし、本研究のように広範なネットワーク規模において全ての利用可能pathを列挙し、かつpath毎のサービスレベルデータを用意することは、データ収集・作成に多大な作業量を要する。本モデルでは、リンク情報を変化させることでネットワーク条件の変化を表現することが可能であり、全てのpathの情報を用意する必要がない。このため、簡便に外生的なネットワーク変化による影響が分析可能という、実務的なメリットを持つ。

Flightリンクにおけるリンクコスト関数を以下のように想定する。

$$C_a = \left(LT_a + \frac{T}{2F_a} \right) \cdot f(q_a), (a \in \text{Flight}) \quad (6)$$

C_a : リンク a のリンクコスト (Flightリンク)

LT_a : リンク a のラインホール時間

F_a : リンク a の航空便数

T : 利用可能時間 (=1年: 定数)

q_a : リンク a のリンクフロー

(6)式において $f(q_a)$ は混雑によるコスト増加効果を現す項である。航空輸送の混雑によって発生する旅客のコストは、満席のために搭乗をあきらめなければならないことなどの不便益と見なすことができる。例えば、代替経路を利用せざるを得ない場合に必要となる余分な時間や費用、旅行自体を中止した場合において旅行が可能であった際に得られる便益の犠牲分などが挙げられる。

航空輸送では座席に空きがあれば搭乗可能であるため、フライト単発での状況を想定すれば、座席容量が埋まらない限り、混雑によるコスト増加は発生しないと考えることもできる。しかし、交通ネットワークモデルは、単位のミクロな需要ではなく、一定期間(例えば1年)における路線需要を対象とするものである。したがって、ある期間における輸送容量に対して同期間の需要が近づくと、満席となる便が存在する確率が増加することとなる。すなわち、期間全体を通して考えれば、路線輸送量に依存して、混雑コストが変動すると考えることができる。

混雑項は以下のように想定する。

$$f(q_a) = \left[1 + \alpha_1 \cdot \left(\frac{q_a}{\beta \cdot \text{Capa}_a} \right)^{\alpha_2} \right] \quad (7)$$

Capa_a : リンク a の輸送容量 (座席数)

$\alpha_1, \alpha_2, \beta$: パラメータ

式(7)において、 α_1 と α_2 は混雑によるリンクコスト増加の度合いを表すパラメータである。同様に、 β は、混雑状況が発生する段階でのロードファクターに関連するパラメータである。

なお、本モデルにおいては、リンクコストのとしてリンク輸送容量を定義しているが、フロー配分においてリンクの容量制約を明示的に設定していない。すなわち、ここで設定した輸送容量は、制約条件としての位置づけではなく、リンクにおける混雑状況の生じやすさを示す指標としての位置づけである。リンクの容量制約を明示的に考慮することで、理論的にはモデルがより精緻化されるが、計算の負荷が大きくなるなど、実用的な面でのデメリットが大きくなるので本研究では扱わないこととした。

Transitリンクにおいては、以下のようにリンクコスト関数を想定する。

$$C_a = TR_a \quad (a \in \text{Transit}) \quad (8)$$

C_a : リンク a のリンクコスト (Transitリンク)

TR_a : リンク a のトランジット時間

本モデルでは、トランジットの際に要する時間コスト

要因として、乗り継ぎ時間のみを対象とした。したがって、このリンクコストは、Transitリンクにおけるリンクフローに依存しない。実際には、便数や路線数などのサービスレベルによって時間コストが変化しうると考えられるが、その改良は今後の課題とする。

GenerationおよびConcentrationリンクについては、コストが生じないものと仮定している。すなわち、空港へのアクセス、イグレスは無視され、これらの属性のリンク a においては、 $C_a=0$ となる。

本研究は、国際航空ネットワークにおける旅客流動を分析対象としている。国際間旅客流動において、旅客の発生集中地に関するOD情報を厳密に把握することは困難であり、現実には、空港間ODベースでの発生集中地が最も詳細な単位のデータとなることが多い。

また、上記のデータ制約と関連して、本研究は同一都市圏に複数空港が存在する場合、これらの空港を無差別と見なす。このため、アクセス・イグレス条件による空港選択は考慮されない。

以上の理由から、本研究では、旅客の発生集中地を空港（都市圏空港群）単位として扱うため、アクセス・イグレスに相当するGenerationリンクとConcentrationリンクにおいては、移動抵抗を考慮しないこととした。

(3) モデルのパラメータ推定および再現性

上記のモデルをUEFD問題として捉え、リンクコスト関数のパラメータ推定を行う。パラメータ推定のためには、国際航空輸送ネットワークにおけるリンク情報データとODデータが実績値として必要となる。

本研究は、リンク情報のデータとしてICAO発行のTraffic by Flight Stage統計（以下TF）データ¹¹⁾より、路線距離、路線便数実績、供給座席数、旅客数を用いた。TFデータは、ICAOによるエアラインへの質問調査を基に作成されるため、未報告エアラインがある場合、データ欠損が生じる。このため、本研究では、TFデータの欠損部分を、OAG時刻表¹²⁾を用いて、週間運航情報を年間拡大することにより補完した。

国際旅客ODデータとしては、ICAO発行のOn Flight Origin and Destination統計（以下OFOD）データ¹³⁾を用いた。OFODデータは、国際航空旅客の航空券ベースのデータを集計したものであるが、企業情報保護のため、2社以上のエアラインが運航しているODのみが統計データとして公表されている。したがって、単一社運航の国際ODデータが含まれないという問題点がある。しかし、アジア地域全般を対象として、旅客OD情報を得られるデータとしては、より望ましいデータが存在しない。国際旅客ODデータをより正確に推定することは、今後の重要な課題である。なお、各統計データの年次は全て2000年におけるものである。

モデルの対象となる空港は、ミャンマー以東のアジア地域諸国において、国際路線が就航する空港とした。以

上の前提条件の下で作成された対象ネットワークの規模を表-1に整理する。

また、パラメータ推定において、国際旅客ODをUEFD配分し、各Flightリンクのリンクフローを推定し、残差自乗和を最小にするパラメータの組合せを探索する方法を用いた。推定されたパラメータの値は表-2に示すとおりである。

表-1 対象ネットワークの規模

東アジア域内空港数（ノード数はこの4倍）	114
東アジア域外空港数（ノード数はこの4倍）	124
ODペア数	679
Flightリンク （東アジア域内→東アジア域外）	436
Flightリンク （東アジア域外→東アジア域内）	380
Flightリンク （東アジア域内→東アジア域内）	601
Flightリンク （東アジア域内の国内々）	1,174
Transitリンク	15
Generationリンク	235
Concentrationリンク	235
リンク数計	3076

表-2 Flightリンクのパラメータ

パラメータ	値
α_1	0.8939
α_2	2.1469
β	0.91

α_1 と α_2 は、整数計画問題のメタ戦略解法である、多スタート法とシミュレーテッド・アニーリング法を併用することにより、パラメータベクトルを離散的に探索し、ヒューリスティックに推定した。本研究ではリンクの容量制約を明示的に考慮していないが、実質的には α_2 の値が1以上の正值であるため、混雑度合いに応じて指数関数的に通過コストが増加することとなり、容量を大きく上回るフローが生じにくい構造となっている。 β に関しては、対象とする地域の航空ネットワークの中で最大のロードファクターである0.91とした（表-2）。

Transitリンクを設定するにあたり、トランジット可能な国際空港を前提条件として与えた。選定の基準として、作成した航空路線ネットワークデータを基に、発着路線数が60以上である空港をTransitリンクを持つ空港として定義した。Transitリンクにおけるトランジット時間は、トランジットに要する時間を公表値として把握すること

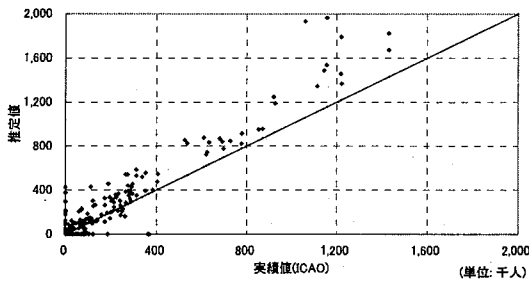


図-2 アジア域内航空路線ベースの再現性

が可能な唯一の資料であるOAG時刻表に示されている Minimum connecting times を基に、際際、際内、内際乗り継ぎ時間の平均値とした。

現状再現性の検証は、2000年TFデータ（航空路線）の旅客数実績と推定リンクフロー（Flightリンク）を比較することによって行った。アジア域内航空路線ベースで見た実績値と推定値のプロットを、図-2に示す。

図-2より、リンクフローの残差は、全体的に過大推計の傾向となることが確認できる。正の実績値に対してゼロの推定値が観察された結果については、ODデータ

（OFODデータ）が単一社運航データを含んでいないという特性や、未報告によるOFODデータの欠損が主な要因になっていると考えられる。逆に、ゼロの実績値に対して正の推定値が確認された結果についても、路線旅客数実績であるTFデータの欠損が一要因と考えられる。

また、本分析においては、香港発着中国本土路線と台湾発着中国本土路線を国際航空路線として扱った。しかし路線旅客数実績データであるTFデータには、これらの路線が国際路線として扱われていない。図-2の値には、前者の推定結果も含まれているため、ゼロ実績に対する正推定値が生じるという結果が見られる。

残差が大きいリンクは、クアラルンプール、シンガポール、バンコク、香港等を結ぶリンクに集中している。リンクフロー推定値を詳細に確認すると、このような短距離リンクにおける過大推定の傾向が見られる。すなわち、東南アジアにおいては、これらの空港間路線を含む乗り継ぎ経路の利便性が過大に評価され、“細切れ”に乗り継ぎ旅客フローが過剰に流れる結果が生じることとなる。結果的に、直行経路の利便性が過小評価され、乗り継ぎが生じる空港を利用する旅客需要フローが大きくなっていると考えられる。

したがって、こうした結果が生じるの原因として、トランジットによる抵抗を表すリンクコストが適切でない可能性がある。この点の改良については、今後さらに、ネットワーク概念やリンクコスト定義の改善が必要と考えられる。

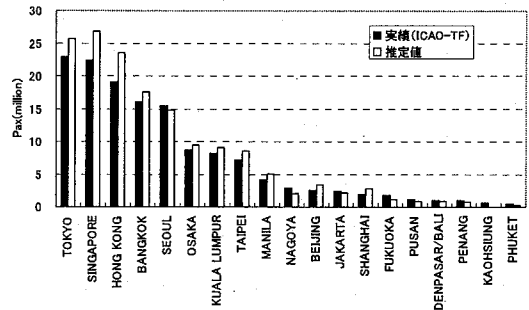


図-3 空港需要ベースの再現性

Flightリンクのフローを発着空港毎に集計し、各空港における発着国際航空旅客需要の推定値を算出した。国際旅客数が100万人以上である空港を対象に、推定値とTFデータ集計（発着空港毎にリンクフローを集計）ベースによる国際旅客需要実績値を比較した結果を図-3に示す。

空港毎の国際航空需要について、大規模空港ではやや過大推計という結果となっている。需要規模の大きな空港において過大推計傾向であることは、ハブ空港経由ルート需要が過大評価され、小規模空港からの海外直行ルート需要が過小評価されている可能性があることを示している。しかし、一部の空港を除き、全体的な傾向は再現されているといえる。

推定値が実績値よりも小さな値を示している場合には、データ制約によりOD需要の入力値が単一エアラインの運航するOD需要を含んでいないことが影響していると考えられる。

トランジット旅客需要の再現性についても、推定値の乖離が大きい空港が多いが、需要規模の傾向は概ね表現されている（図-4）。なお、トランジット旅客の実績値として、トランジット旅客数をそれ以外の旅客数と区別

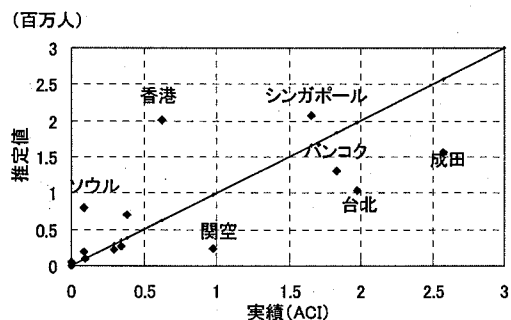


図-4 トランジット旅客の再現性

して公表しているACI Annual Worldwide Airport Traffic Report¹⁴⁾におけるDirect Transit Passengersを用いた。

4. 東アジア航空ネットワークの仮想シナリオによるシミュレーション分析

本章は、将来の東アジア航空ネットワークにおける仮想的なシナリオを用いてシミュレーション分析を行い、想定される旅客流動変化について考察する。本モデルは、OD需要とエアラインの路線設定を外生条件としており、ネットワークを流れる旅客需要のみが出力値となる。

(1) 中国発着 OD 需要増加シナリオのシミュレーション分析

本シミュレーションでは、中国発着のOD需要が増加した状況を仮想的シナリオとして想定し、モデル出力である航空旅客流動の変化を分析する。具体的には、ネットワーク条件を不変のまま、中国国内空港を発着地とするOD需要を50%増加させるというインパクトを与え、ネットワークフローに生じる変化を分析する。

空港毎に集計した、アジア域内航空旅客需要の変化を

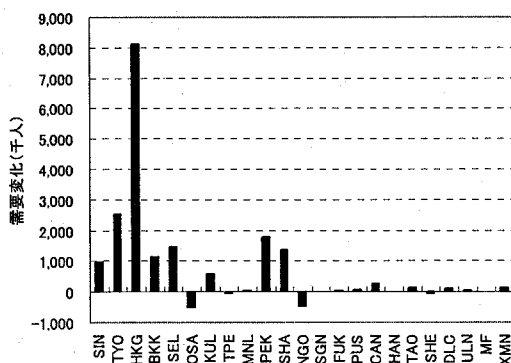


図-5 中国発着 OD 需要増加シナリオにおける各空港需要の変化量

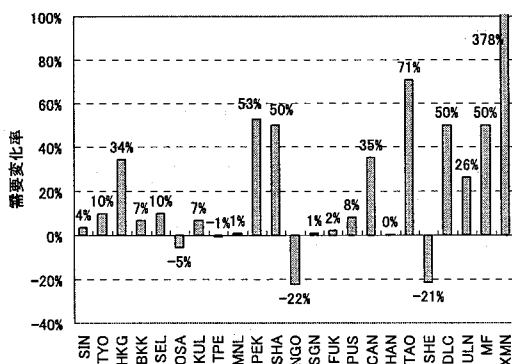


図-6 中国発着 OD 需要増加シナリオにおける各空港需要の変化率

図-5に示す。最も大きな旅客数増加が見られたのは、香港(HKG)であり、基本ケースから800万人以上の需要増加効果が確認された。次いで、東京成田(TYO)、北京(PEK)、ソウル(SEL)、上海(SHA)、バンコク(BKK)の順に、増加量が多い。

逆に、大阪関西(OSA)、名古屋(NGO)では、需要が減少するという結果となっている。旅客数の増加に伴う、一部航空リンクにおける混雑の増加が、経路(時間)コストを変化させ、これらの空港における国際航空需要を減少させている。成田空港を経由する経路へのシフトが生じたと考えられる。

図-6は、結果を需要の変化率で表したものである。廈門(XMN)、青島(TAO)をはじめとする、中国空港における変化率が相対的に大きいことが確認できる。廈門における需要増加率が非常に大きいことは、基本ケースでは国内他空港を経由していた国際旅客の利用経路が、直行経路にシフトしたことによるものである。

これらの旅客流動への影響は、航空需要の増加に伴い、航空路線における混雑抵抗が変化することに起因するものである。本分析においては、航空ネットワークのサービスレベルを固定した状態でのOD増加インパクトであるため、容量逼迫が生じやすい状況を想定している。

実際には需要の伸びに合わせて供給量も増加することが考えられ、本分析で設定した外生インパクトは、予測のためのシナリオとしては適切ではない。現実的な将来予測のためには、OD需要だけではなく航空路線ネットワークも変化させるシナリオが必要である。

(2) アジア地域における機材サイズ小型化シナリオのシミュレーション分析

エアバス社の超大型航空機材A380が、近い将来に航空市場に導入されるため、その影響はしばしば議論されている。一方で、近年、リージョナルジェットと呼ばれる小型機が各国航空市場で増加しており、欧州では国際路線へも数多く投入されている。

本節は機材サイズに関するシナリオの一つとして、アジア地域における航空ネットワークにおいて使用される機材が小型化した状況を想定し、シミュレーション分析を行う。機材の小型化が定量的なサービスレベルについて意味することは、1便あたりの供給座席数が減少することであるが、その例の両極として2つの状況が想定できる。

第一は、供給座席数に変化を与えず平均的機材サイズが小型化する場合であり、その結果として便数増加という効果がもたらされる。第二は、便数に変化を与えず平均機材サイズが小型化する場合であり、この結果としては、供給座席数が減少するというサービスレベル低下がもたらされる。

実際には、供給座席数と便数の両方に変化が生じ、上記2ケースの中間的状況となることが考えられる。しか

し、供給座席数と便数それぞれの変化についての組合せは無数に存在するため、本分析は上記両極のケースについて航空旅客流動に及ぼされる影響を推定する。機材小型化というシナリオに関しては、これらの結果を比較して、効果を判断する必要がある。

a) 供給座席数不変便数増加の場合

機材小型化シナリオとして、アジア域内の国際航空路線において、提供座席数が不変のまま平均座席数が20%小型化した状況を外生変化として与える。結果として、各路線において便数が増加するというサービスレベル向上効果が生じる。

旅客流動の変化を空港毎に集計した結果を図-7に示す。小型化に伴う便数サービスレベル向上により、大きく旅客数増加効果が表れているのは、ソウル(SEL)、香港(HKG)、東京成田(TYO)などである。逆に、シンガポール(SIN)、台北(TPE)、大阪関西(OSA)では、需要減少の効果がみられる。

同様に、変化率で表した結果は図-8のとおりである。廈門(XMN)、クチン(KCN)では100%以上の需要増加となり、ペナン(PEN)、青島(TAO)においても比較的大きな増加が見られる。瀋陽(SHE)、名古屋(NGO)では、減少率が大きい。本分析結果より、中国東北部および東部

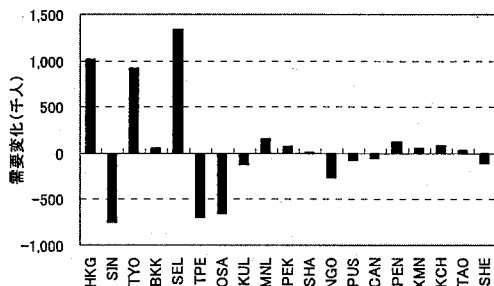


図-7 機材小型化（供給座席数固定）シナリオにおける各空港需要の変化量

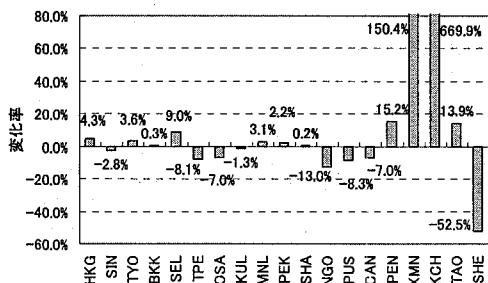


図-8 機材小型化（供給座席数固定）シナリオにおける各空港需要の変化率

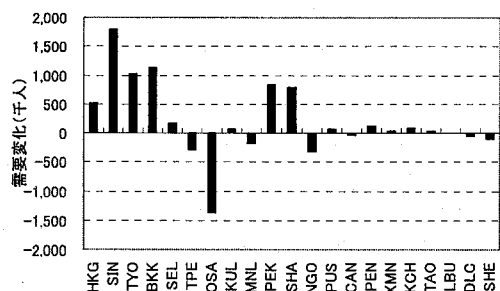


図-9 機材小型化（便数固定）シナリオにおける各空港需要の変化量

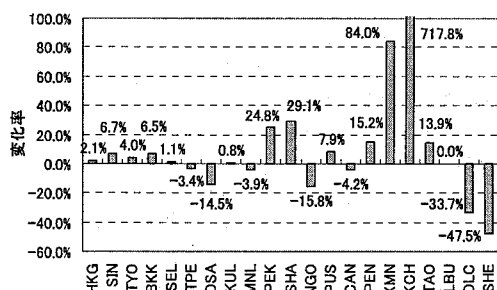


図-10 機材小型化（便数固定）シナリオにおける各空港需要の変化率

と東南アジアの空港において、相対的に大きな影響が生じるという特性が把握できる。

b) 便数不変供給座席数減少の場合

同様に機材小型化シナリオとして、アジア域内の国際航空路線において、路線便数が不変のまま平均座席数が20%小型化した状況を外生インパクトとして与える。その結果、各路線において供給座席数が減少することとなり、混雑効果が現れやすくなるというサービスレベル低下が生じる。

本分析において確認される各空港の需要量変化を図-9に示す。シンガポール(SIN)、バンコク(BKK)、東京成田(TYO)、北京(PEK)、上海(SHA)等では、比較的大きな需要増加効果が見られる。逆に、大阪関西(OSA)では大きく減少している。

変化率についての結果を図-10に示す。クチン(KCN)や廈門(XMN)のような、相対的に小規模な空港では大きな増加率を示しており、瀋陽(SHE)や大連(DLC)では、需要減少率が大きい。我が国においては、関西(OSA)と名古屋(NGO)の需要が減少するという結果が見られる。

c) 機材小型化シナリオの分析結果に見られる特徴

本分析では、機材小型化シナリオを、供給座席数を変えずに便数が増加した状況と、便数を変えずに供給座席

数が減少した状況の2つの外生インパクトとして与えた。これらはどちらも機材小型化の想定シナリオの両極と言えるが、分析結果には共通する特性がいくつか現れている。

どちらの場合においても、大規模空港では香港と東京成田、比較的小規模の空港では廈門、クチン、ペナン等で、大きな需要増加効果が見られる。また、ソウルと北京に関しては、便数増加の場合はソウルにおいて、座席数減少の場合は北京において、需要増加効果大きい。これに対して、大阪関西、名古屋、台北、広州、瀋陽では、どちらの機材小型化シナリオの場合でも、需要が減少するという結果となった。シンガポールに関しては、外生インパクトの与え方によって需要の変化方向が逆になり、機材小型化による需要の増減を一概に結論づけられない。

これらの分析結果によれば、我が国の関西、名古屋（中部）空港では、航空ネットワークの機材小型化によって、旅客需要が他空港（主に成田）へシフトしやすいという特性を示している。個別路線におけるシフト要因を詳細に検討するには、Flightリンクにおけるリンクコストの変化を観察する方法が考えられる。しかし、本研究ではネットワーク全体としての流動変化特性を分析することに主眼を置いているので、個別リンクにおける変化要因については本分析の対象外とする。

本分析では、アジア域内全体に対して同水準で機材小型化が生じた場合のシナリオを想定している。このため、局地的な機材変化インパクトが生じた場合には、本分析と異なる効果が現れる可能性がある。本シナリオ分析の結果は、平均的な機材小型化による、平均的な旅客流動パターン変化の方向性という位置づけられる。具体的な局地的航空ネットワーク変化については、次章のように別途シナリオを用意して分析する必要がある。

5. 関西国際空港のサービスレベル向上シミュレーション

前章は、アジア全域に対して、一定のOD変化パターンと航空サービスレベル変化パターンを与えたシミュレーション分析を行った。本章は、局地的な外生インパクトをシナリオとして与え、シミュレーション分析を行う。

任意の地域において、便数や座席数の増加を伴うサービスレベル向上がもたらされると、式(6)、(7)からも明らかにようにFlightリンクでのリンクコストが低下する。その結果、当該リンクを含む経路の総（時間）コストが低下し、競合経路から旅客需要フローがシフトする可能性が生じる。

しかし、経路フローの変化に伴って、Flightリンクのリンクコストも変化する。このとき、フローが増加した経路に含まれ、かつサービスレベルが基準状態から不変のFlightリンクにおいては、混雑効果によるコスト増加

が生じる。したがって、経路の一部にボトルネックの箇所が含まれている場合、Flightリンクのサービスレベル増加は、必ずしも当該リンクを含む経路フローの増加をもたらすとは限らない。本研究が対象とするネットワーク規模では、解析的に配分モデルの均衡解を導出することは実質的に不可能なので、収束計算（本研究ではFrank-Wolf法を採用している）により解を求める必要がある。

本章は、関西国際空港を一例として、単一空港における航空サービスレベルの向上が、どのような影響を及ぼすか分析を行う。関西国際空港では現在二期事業が進められており、第二滑走路が供用されると滑走路容量に大きな余裕が生まれる。エアラインの供給量は市場で決定されるため、容量増加が航空サービスレベル向上を直接的に意味するものではない。しかし、利便性の高い時間における発着枠の増加等により、発着便数が増加する可能性は考えられる。本章のシナリオは、こうした背景を鑑みた、近似的な仮想将来条件を設定したものである。

具体的には、基準状態における関西国際空港発着アジア方面国際航空路線について、便数と座席数を同時に変化させ、旅客流動パターンの変化を観察する。外生インパクトとして、これらの値が、基準時よりも10%増加した場合から50%増加した場合まで、10%刻みで5パターン想定した。なお、路線網形状には変化を与えていない。

結果としては、全航空路線における需要変化を観測することが可能であるが、ここでは現実的にも影響が大きく現れると考えられる、東北アジア地域の主要な空港における発着航空旅客需要について評価する。

図-11は、分析結果として、各空港需要の基準状態からの変化率を示している。関西国際空港（OSA）における10%のサービスレベル向上では、OSA自身の需要が減少する結果となっている。この変化率は、収束計算における誤差範囲と考えられ、実質的には旅客流動への影響が微小であると思われる（上海空港（SHA）の変化率が大きいことも同要因と思われる）。30%以上のサービスレベル向上では、明確な需要増加効果が確認される。

国内他空港に着目すると、成田国際空港（TYO）、名古屋空港（NGO）ともに需要減少が確認され、関西国

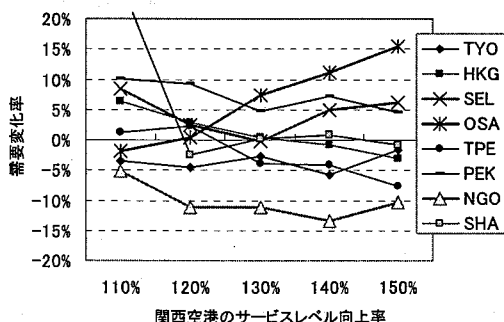


図-11 関空の航空LOS変化による各空港需要の変化率

際空港への需要転換が生じていると推測される。

近隣諸外国の空港においては、結果の傾向がそれぞれで異なる。ソウル（SEL）および北京（PEK）は、需要増加傾向の特性が見られる。香港（HKG）および台北（TPE）については、関西国際空港のLOSが向上するにつれて需要が減少するという結果となった。

以上の結果より、本モデルの特性として、関西国際空港は国内の国際空港とは競合関係にあり、ソウルや北京などの空港とは補完的關係にあることが表現されていると推定できる。国際路線の充実によって利便性が向上し、旅客の経路がシフトするという傾向が現れており、妥当な結果と考えられる。

実務的なインプリケーションとしては、第一に、ソウル仁川空港は、トランジット空港としては競合関係となりうるが、総合的に見れば補完的なパートナー関係にあると考えられ、相互のサービス利便性向上による効果が大きいであろうと推測される。

第二に、本分析においてはサービスレベルを20%向上させた場合までは、目立った需要増加効果が現れなかった点が特徴的である。すなわち、現状では需要シフトが生じにくい状態にあり、関西国際空港が転換需要を確保するためには、小規模のサービスレベル向上では効果期待されず、大幅なサービスレベル向上が必要である可能性がある。本分析では、外生的にエアラインの供給量を増加させているが、実際には市場状態を反映して供給行動が行われる。したがって、サービス供給量の増加をもたらすためには、エアラインのコストや効率性などの生産構造に直接影響を及ぼすような政策を検討しなければならない。

6. おわりに

中国が他地域よりも高い航空需要成長となることは、IATAや航空機材メーカーの需要予測においても示されている。機材サイズの小型化については、比較的不確実性が大きいですが、将来の可能性の一つとして考えられる。本研究では、これらの状況を簡略化して想定したシナリオを用いてシミュレーション分析を行った。

ただし、本研究の与えたシナリオは、将来の状況を精緻に反映したものではない。例えば、中国需要増加シナリオにおいては、OD需要の変化にもかかわらず航空ネットワークにおけるサービス水準が不変という、非現実的な仮定を置いている。精緻な将来予測のためには、手法の改良のみではなく、与えるべき将来条件シナリオについても精査しなければならない。

本研究で開発したモデルは、標準的な利用者均衡配分問題の概念を利用し、ネットワークとリンクコストの考え方について、国際航空輸送を反映するよう応用したものである。本モデルには、供給側であるエアラインの行動を外生としているという課題があるが、国際航空輸送

市場は多くの規制により自由競争市場ではないという背景がある。需要者側の行動に特化した分析を目的とする場合には、供給側である航空ネットワークを外生的シナリオ化することは一定の妥当性を持つと考えられる。本研究はこのような視点から、東アジアの航空ネットワークにおける旅客流動について、今後生じうる状況をシミュレーションしたものである。

政策支援ツールとしての観点からは、航空政策によるエアラインの供給行動への影響分析を狙いとする場合には、エアラインの行動を評価可能なモデリングが必要である。本モデルの適用方向性としては、本研究で行ったような将来状況シナリオに対する単純予測に加えて、ネットワーク形成に係る規制による影響推定への適用が考えられる。

空港間機能分担政策や航空ネットワークのあり方を検討する際に、ペリメータ制限や、国内専用または国際専用のような役割分担などの施策が手段として考えられる。こうした政策は、航空ネットワークの形状を外生的に制御する性質のものである。本モデルではネットワーク形状を操作変数としているので、路線網や便数・座席数を変化させることにより、その結果として実現する旅客流動・空港需要等の出力値を評価することが可能である。今後のモデル適用の方向性として、こうしたネットワーク形状の変化を前提とした政策分析が考えられる。

本研究では、TFデータに含まれる全ての空港を分析対象ネットワーク内のノードとして扱っている。したがって、各国のローカル空港もネットワーク内で明示的に扱われる。このため、新たなリージョナル航空路線の開設や、ハブアンドスポーク化および直行路線増加などのネットワーク形状変化などによる、ローカル空港需要の変化分析等へも発展させることが可能と言える。

今後の課題として、モデルの現況再現性については、手法の構造自体の改良と、入力値として用いるOD需要データ精度の向上の点において、改善の必要があると考えられる。

手法の技術的側面については、第一に、トランジットのモデル化の方法が単純化されているという課題がある。本モデルでは、トランジットによる旅客にとっての時間的コストを固定化しているが、混雑による影響や、路線数および便数増加によるサービスレベル向上などにより、トランジットに対する抵抗が変化する可能性が考えられる。今後、こうした点をモデルで反映できるよう改善したいと考えている。

また技術的な第二の課題として、利用者均衡配分では経路間にコスト差がある場合、低コスト経路が100%利用されるという特性があるため、前提条件を変えると旅客流動パターンが過敏に反応するという特性がある。この特性は、流動変化の傾向を分析するためには適しているとも考えられるが、フロー量自体の推定精度を高めるためには、SUE問題への改良等が有効と考えられる。

データに関する課題として、OD需要の入力値については、ICAOの発行するSeries OFODの値を用いているが、当該データは企業情報保護のため、単一エアラインの運航するOD需要データが含まれない。この点が、小規模空港における需要データ欠損の原因となり、モデルの現況再現性における課題となっている。我が国においてもこの問題の影響を受ける空港は多いので、モデルの改良とともに、OD旅客需要実績値の推定も今後の課題である。

参考文献

- 1) 戸崎肇: 航空の規制緩和, 勁草書房, 1995
- 2) 長谷川通: エアラインエコノミクス, 中央書院, 1997
- 3) 三輪英生, 花岡伸也: 我が国の航空協定のあり方と交渉戦略, 土木計画学研究・講演集, No.27, CD-ROM, 2003
- 4) Kanafani, A. and Ghobrial, A.: Airline Hubbing –Some Implications for Airport Economics, Transportation Research -A vol.19A, No.1, 15-27, 1985
- 5) Harvey, G.: Airport Choice in a Multiple Airport Region, Transportation Research -A vol.21A, No.6, 439-449, 1987
- 6) 古市正彦, Koppelman, F.: 国際航空旅客需要に関する統合型予測モデルの開発, 土木計画学研究・論文集, No.11, 239-246, 1993
- 7) 森地茂, 屋井鉄雄, 兵藤哲朗: わが国の国際航空旅客の需要構造に関する研究, 土木学会論文集, No.482, IV-22, 27-36, 1994
- 8) 屋井鉄雄, 高田和幸, 岡本直久: 東アジア圏域の国際航空ネットワークの進展とその効果に関する研究, 土木学会論文集, No.597, IV-40, 71-85, 1998
- 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) 家田仁, 望月篤, 柴崎隆一, ファン レ ビン: 旅客およびエアラインの行動に基礎をおいた階層的フライトネットワークモデル, 土木計画学研究・講演集, No.24, CD-ROM, 2001
- 11) International Civil Aviation Organization: Digest of Statistics Series TF, 2000
- 12) OAG, OAG Flight Guide May 2000, 2000
- 13) International Civil Aviation Organization: Digest of Statistics Series OFOD, 2000
- 14) Airport Council International: ACI Annual Worldwide Airport Traffic Report, 2000

東アジア航空ネットワークにおける国際航空旅客流動分析のためのモデル開発*

石倉智樹**

近年では我が国を取り巻く東アジアにおける航空ネットワークに大きな変化を迎えつつある。かつ、我が国の航空政策とは独立にもたらされる外生的な状況変化が想定される。本研究は、こうした状況下において政策決定を支援するための需要推定手法として、ネットワーク配分モデルのコンセプトを用いて東アジアの国際航空ネットワークにおける旅客流動分析モデルを構築した。さらに、仮想的な将来シナリオとして、中国のOD需要増加シナリオと東アジア域内における機材小型化などのいくつかのシナリオを設定し、シミュレーション分析を行った。

A Practical Modeling of International Air Passenger Flow in the East Asia *

By Tomoki ISHIKURA**

Recently, the East Asia region's air transport system faces dynamic movements such as economic and air traffic growth, emerging LCC, new hub airports and so on. The prospect of future air demand distribution is an important task for air transport policy planning. This article proposes a network model for the analysis of East Asia's international air passenger flow pattern based on user equilibrium problem. Applying the model to some future scenarios; growth of China's air demand, downsizing and Kansai Airport's network development, the author estimates the influence on passenger flow.