

平成 19 年度国土政策関係研究支援事業 研究成果報告書

東アジア圏の航空ネットワークを考慮した
我が国の広域ブロック圏ゲートウェイ政策
の評価に関する研究

東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻准教授

加藤 浩徳

目 次

要旨	1
本編	6
I. 研究目的・意義	7
1. はじめに	7
1-1. 本研究の背景と目的	7
(1) 本研究の実施背	7
(2) 本研究の目的	8
(3) 本報告書の構成	8
1-2. 既往の研究と本研究の位置づけ	9
(1) 航空ネットワークに関連する研究の全体像	9
(2) 「需要」に主眼を置いた研究	9
(3) 「供給」に主眼を置いた研究	9
(4) 「需要」と「供給」の双方を考慮した研究	10
(5) 本研究の位置づけ	11
2. 国際航空市場の基礎的分析	12
2-1. 規制緩和の潮流	12
2-2. LCC の登場	13
2-3. 日本における国際航空市場の現状	14
II. 研究手法	15
3. 計量経済モデルの構築	15
3-1. モデル構築の基礎要件	15
3-2. モデルの全体構造	15
3-3. モデル	17
(1) ネットワークの定義	17
(2) 旅客の行動	17
(3) エアラインの行動	17
(4) 市場の未知変数と均衡条件	18
3-4. モデルの計算方法	19
3-5. 使用するデータ	20
(1) データ収集の対象	20
(2) ゾーニングと需要データ	20
(3) 交通サービス水準データ	20

3-6. 旅客の行動の計算	22
(1) ルートの設定方法	22
(2) リンクの種類	22
(3) 航空経路選択モデルの効用関数	23
(4) フライト遅延時間の導出	24
3-7. エアラインの行動の計算	25
(1) リンクの設定方法	25
(2) 一便当たり旅客数の推定	25
(3) 各エアラインの費用関数の設定	25
III. 成果内容	27
4. モデルによるシミュレーション分析	27
4-1. 前提条件	27
(1) ネットワークの設定	27
(2) フライト遅延時間について	27
(3) 一便当たり旅客数の推定	27
(4) エアラインの設定	28
4-2. シミュレーション結果	28
(1) 各ケースの概略	28
(2) ケース1, ケース2 の計算結果	29
(3) ケーススタディの分析結果(ケース0とケース1 およびケース2 の比較)	31
(4) 分析結果に対する考察と政策上の示唆	32
5. まとめ	34
5-1. 結論	34
5-2. 今後の研究課題	34
付録1 プログラムの構成	38
付録2 最適化計算のアルゴリズム	40

報告書要旨

I. 研究の目的・意義

(1) 研究の背景と目的

人口減少とともに内需縮小が予想される我が国にとって、今後の持続的成長のためには、東アジア諸国との密接な連携が欠かせない。その手段の一つとして、国際的な航空ネットワークの活用が、きわめて重要と考えられる。これに関して、「計画部会中間とりまとめ」（平成18年11月：国土審議会計画部会）では、首都圏空港の混雑緩和、各地域の国際競争力の向上、東アジアビジネス日帰り圏構想等の観点から、広域ブロック圏単位にゲートウェイ空港を整備する必要性が記されている。ここでは、ゲートウェイ空港整備を通じて、地方空港でも、東アジアを対象とした国際線の集積を高めることが期待されている。ちなみに、ゲートウェイ空港とは、選択的、集中的に機能が拡充された既存空港のことを指す。

その一方、諸外国の航空旅客市場においては、ローコストキャリア（以下、LCC）と呼ばれる格安航空会社が活躍し、国際航空ネットワークの形を変化させている。これに関連して、最近、わが国の国際航空市場において、二つの規制緩和が決定された。一つは、地方空港における外国航空会社の参入自由化であり、もう一つは、国際航空運賃の下限規制撤廃である。これにより、LCCが多くの国際線を地方空港に開設し、既存キャリアの行動も変化することが予想される。

今後の我が国の空港計画、航空政策を検討するためには、上記の国土政策ならびに国際航空市場の動向を踏まえた上で、ゲートウェイ空港の整備計画（空港整備優先順位、整備規模）がどうあるべきか、またどのような航空政策（首都圏空港への乗入れ規制）が旅客やエアラインにとって望ましいかを議論する必要がある。しかし、従来の検討では、旅客数の8割を占める主要空港（成田・関西国際空港）だけを考慮することがほとんどであり、地方空港を含めた議論は十分なされてこなかった。また、主要空港だけを考慮するために、成田空港において容量がひっ迫していることを受けて、LCCの新規参入がほとんど議論されていないという問題がある。

そこで、本研究は、旅客およびエアラインの行動を理論的に明確な形で表現し、国際航空市場において、LCCの参入や空港整備状況を入力した場合に、出力としてネットワークの形、路線運賃・旅客数、各空港の国際線便数が得られる、計量経済モデルを構築する。分析対象は日本各地と東アジアを結ぶネットワークとし、LCCの参入や空港管理者の行動が航空ネットワークに与える影響を分析する。

(2) 既往研究における本研究の位置づけ

航空市場、航空ネットワークに関する研究は、すでにかんがりの蓄積がある。これら

は、「需要」に主眼を置いた研究、「供給」に主眼を置いた研究、「需要」と「供給」の双方を考慮した研究とに分類することができる。ところが、「需要」と「供給」の双方を考慮した既存の研究では、運賃がすべてのエアラインに対して同一、もしくは外生であると仮定されることがほとんどであることがわかった。そのため、既存研究の枠組みでは、LCC が参入した場合の運賃変化および消費者が得る利益を算出することはできず、既存の研究では LCC 参入の是非を評価できないという限界がある。本研究で提案する手法は、安藤・大橋(2004)の考え方を踏まえた上で、エアライン別の運賃の差を表現できるベルトランナッシュ均衡を組み込んだ計量経済モデルを用いているという点で、新規性のあるものと考えられる。

II. 研究方法

(1) モデルの概要

本研究では、旅客とエアラインの二者を対象とした航空市場モデルを使用する。航空市場では、需要である各経路の旅客数と、供給である各エアラインの各経路の運航便数とが均衡するよう、運賃が決定されるものとする。旅客需要は、利用する経路から得られる利便性（効用水準）に応じて、確率的に最も効用水準の大きい経路を選択するものと仮定する。効用関数としては、経路のサービス水準を構成する要素、各エアラインが定めた運賃、運航時間、運航便数、乗り継ぎの有無からなるものを使用する。一方で、各エアラインは、旅客の行動によって決定された、自社路線内の旅客需要を満たす条件のもと、自社の利潤を最大とするよう、各路線の輸送サービス水準である、運賃と便数を決定する。ここで、エアラインが同一路線に複数存在し、競合している場合には、運賃競争の結果として利潤を最大化するという、ベルトランナッシュモデルを想定する。

(2) 計算アルゴリズム

上記の理論モデルをもとに、東アジア航空市場を想定した計量的なモデルを構築するため、計算機で均衡解を産出可能な計算アルゴリズムを構築した。アルゴリズムは旅客とエアラインの間の市場均衡解を求める部分と、各エアライン間のベルトランナッシュ均衡解を求める部分との二つに分かれる。

初期値として、現状の OD 別旅客数と交通サービス水準データを用いる。旅客とエアライン間の繰り返し計算（繰り返し計算 A）を始める。旅客は各ルートの旅客数を、エアラインは自社リンクの運賃・便数を決定する。

まず、旅客については、所与のロジットモデルにより各経路の旅客数を決定する。ここで、エアラインの交通サービス水準の差が各経路の効用に反映されるように、航

空経路をエアライン別に設定する。つまり、同一路線でもエアラインが異なるならば、別経路と見なしている。効用水準に応じて、経路ごとに配分される旅客数をリンクごとに数え上げ、それをエアラインに受け渡す。

次に、各エアラインは、自社リンクの旅客数を所与として、自社リンクの便数を決定する。ここで便数は、ロードファクターと機材容量から求められる。ここで、エアライン間の競争均衡を求めるため、エアライン間の繰り返し計算（繰り返し計算 B）を始める。ここで、利潤が最大となるように自社リンクの運賃を決定する。そのとき、各エアラインは他者リンクの運賃・便数および②の自社リンクの旅客数を所与として計算する。繰り返し計算 B は、一つ前の計算結果とリンク運賃の差が十分小さくなる、もしくは利潤をさらに高くする運賃が近傍に見つからない場合に収束したとみなす。そして、得られた各リンクの運賃と計算された便数を、繰り返し計算 A に戻って旅客に受け渡す。繰り返し計算 A は、一つ前の計算結果とリンク旅客数の差が十分小さくなる場合に収束したとみなす。

(3)分析対象と使用データ

本研究の分析対象は、日本各地と東アジアを結ぶネットワークである。それに従いデータ収集の対象は、東アジア方面へ国際定期便のある空港の、国際航空路線を利用する出入国日本人及び出入国外国人とした。また、日本人は観光・業務等目的の二区分、外国人は全目的の一区分とする。国内ゾーンは、北海道を四分割した都道府県単位で 50 ゾーン設定する。海外ゾーンは、全世界を 32 地域に分割し、その中でも需要が多い 12 ゾーンを用いる。需要データとしては、平成 17 年度国際航空旅客動態調査を用いた。一方で、旅客の行動については、国土技術政策総合研究所(2005)の国際航空旅客需要予測法における航空経路選択モデルおよび空港アクセス交通機関選択モデルを適用した。ここで、旅客の行動は空港アクセス交通機関選択の結果を踏まえて航空経路選択を行う、ネスティッド型の非集計ロジットモデルで表される。

III. 研究成果

(1)ケーススタディの設定条件

日本と上海とを結ぶ路線を対象として、構築された計量経済モデルを用いたシミュレーション分析を行った。上海線を選んだ理由は、2005 年時点で日本の 16 空港と路線を持ち、多様な出国空港選択行動が含まれるからである。シミュレーションにおける前提条件を示した上で、ローコストキャリアの参入と異なる組み合わせの空港に参入した場合の違いを分析する。

まず、現状の運賃、便数、そして推定された一便当たりの旅客数を用いて、均衡と

なる運賃と便数、旅客数を決定した。これを基準ケースとして、LCC の参入や航空政策を表したケースと比較を行った。具体的に検討したケースは次の三つである。

(a) ケース 0 : 現状ケース

現状の運賃、便数、現状から推定された一便当たりの旅客数を用いた基準ケースである。既存キャリア 2 社が路線を運航する状態を表す。

(b) ケース 1 : すべての空港に LCC が参入可能

既存キャリア 2 社が路線を運航する中で、LCC1 社がすべての空港に参入できる状態を表す。

(c) ケース 2 : 成田空港を除くすべての空港に LCC が参入可能

成田空港において容量不足から乗入れが規制されている現状を反映する。既存キャリア 2 社が路線を運航する中で、LCC1 社が成田空港を除くすべての空港に参入できる状態を表す。

(2) ケーススタディの分析結果(ケース0とケース1との比較)

現状を表現したケース 0 とケース 1 およびケース 2 を比較した結果、以下のことが明らかになった。

第一に、LCC 参入によって正の利用者便益が生じる。これは既存キャリアも含めて運賃が下落し、選択する路線数も増えたことによる。第二に、供給者の総利潤は減少する。これは新たなエアラインが参入したことで競争が激化したことによる。第三に、LCC の参入によって生じる利用者便益が総利潤の減少額を上回り、社会的余剰が拡大する。第四に、利用者便益は LCC が成田空港に参入制限を設ける場合の方が大きい。ここでは LCC がポイントトゥポイント型ネットワークを選択したことによって、多くの路線に参入したことによる。第五に、総利潤の減少額も LCC が成田空港に参入制限を設けない場合の方が大きい。これは LCC が成田空港に参入できないために利潤が減ることと、既存キャリアがより多くの路線で LCC と競合するために利潤を失うことによる。第六に、社会的余剰は参入制限を設ける場合と比べて、成田空港への参入制限を設けない場合の方が大きい。

以上の分析結果から、我が国の空港政策への示唆を論じた。仮に、ブロック圏がそれぞれ独立した地域交通政策を行うものと仮定するならば、ブロック間で一種の空港整備競争が発生する。ここで、中央政府がこの競争に関して何らかのコントロールを行わない場合には、人口が多く集積し、投資余力の最も大きい首都圏、関西圏、名古屋圏の空港整備が早期にかつ確実に行われることであろう。その場合、上の分析結果でも示されるように、これら大都市圏以外のブロック圏は、ゲートウェイとなる空港を整備してもあまり効果が得られない可能性がある。その結果として、国際交通へのアクセシビリティに関して、ブロック圏間で格差が生じる可能性があり、本来、国土形成計画の目標としていた、東アジア諸国との密接な連携への障害となりうる。逆に、

各ブロック圏と東アジアとの交流を促進することを最優先するならば、中央政府は、ゲートウェイ政策に関してある程度のコントロールを行う必要があるものと思われる。

(3)本研究の成果と今後の課題

本研究は、日本各地と東アジアを結ぶ国際航空市場を対象として、旅客およびエアラインの行動を考慮した計量経済モデルを構築した。次に、構築されたモデルを用いて、上海と日本国内の空港とをつなぐ路線を対象としたケーススタディを行い、LCCが参入した場合に、既存キャリアと旅客とに与える影響を分析した。これにより、LCC参入に制限がない場合には、LCCの参入は、特定の大規模空港のみに限られること、成田空港への参入が制限される場合には、LCCは地方空港にも参入しうることがわかった。また、消費者余剰ならびにエアラインの利潤に関する分析を行うことによって、参入制限を設けない場合には、参入制限を設ける場合と比べて、高い社会的余剰が得られるが、消費者余剰は低くなることが判明した。また、以上の分析結果から、我が国の空港政策への示唆を論じた

最後に、本研究の課題としては、エアラインの機材容量およびロードファクターの考慮、運賃および費用の検討、エアラインによる旅客の囲い込みの度合の考慮、空港管理者の行動の考慮、使用データおよび計算量の少ないモデルの検討、旅客の需要変動が挙げられる。

報告書本編

I. 研究の目的・意義

1. はじめに

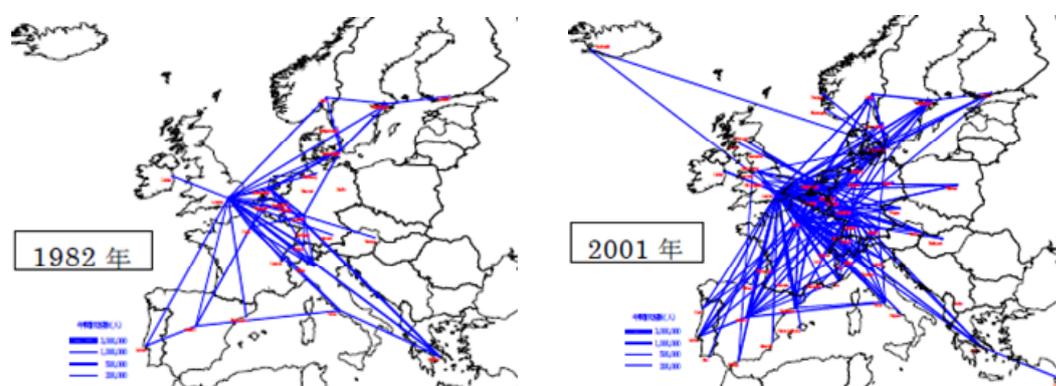
1-1. 本研究の背景と目的

(1) 本研究の実施背景

人口減少とともに内需減少が予想される我が国にとって、今後の持続的成長のためには、東アジア諸国との密接な連携が欠かせない。その手段の一つとして、国際的な航空ネットワークの活用が、きわめて重要と考えられる。これに関して、「計画部会中間とりまとめ」（平成18年11月：国土審議会計画部会）では、首都圏空港の混雑緩和、各地域の国際競争力の向上、東アジアビジネス日帰り圏構想等の観点から、広域ブロック圏単位にゲートウェイ空港を整備する必要性が記されている。ここで、ゲートウェイ空港とは、選択的、集中的に機能が拡充された既存空港のことを指す。そして、現在国際線は首都圏空港に集中しているが、機能の拡充によって地方空港でも、東アジアを対象とした国際線の集積を高めることを意味する。

その一方、諸外国の航空旅客市場においては、ローコストキャリア（以下、LCC）と呼ばれる格安航空会社が活躍し、国際航空ネットワークの形を変化させている。

図表1は、欧州における国際航空路線の変遷である。LCCが参入した1990年代を境に、地方と海外を直接結ぶ路線が大幅に増加していることがわかる。これは、需要が少なくても低費用の利を生かして路線を維持し、さらに、低運賃設定によって需要を掘り起こしたからである。LCCは欧州だけでなく南北アメリカ、オセアニア、東アジアでも活躍し、日本へも2社の海外LCCが参入している。（2008年1月時点）さらに、2007年度、わが国の国際航空市場において二つの規制緩和が決定した。一つは地



図表1 欧州における国際航空路線の変化

出典：国土交通政策研究所

方空港における外国航空会社の参入自由化であり、もう一つは、国際航空運賃の下限規制撤廃である。これにより、LCCが多くの国際線を地方空港に開設し、既存キャリアの行動も変化することが予想される。

このような動向を踏まえたうえで、ゲートウェイ空港の整備計画（空港整備優先順位、整備規模）をどうするか、またどのような航空政策（首都圏空港への乗入れ規制）が旅客やエアラインにとって望ましいかを議論する必要がある。しかしながら、国際航空ネットワークを論じるに当たって、旅客数の8割を占める主要空港（成田・関西国際空港）だけを考慮することがほとんどであり、地方空港を含めた議論は十分なされていない。さらに、主要空港だけを考慮する場合、成田空港において容量がひっ迫しているため、LCCの新規参入が議論されていない。

(2)本研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究の目的は次のとおりである。旅客およびエアラインの行動を理論的に明確な形で表現し、国際航空市場においてLCCの参入や空港整備状況を入力した場合に、出力としてネットワークの形、路線運賃・旅客数、各空港の国際線便数が得られる、計量経済モデルを構築する。分析対象は日本各地と東アジアを結ぶネットワークとし、LCCの参入や空港管理者の行動が航空ネットワークに与える影響を分析する。

(3)本報告書の構成

まず、第1章では、航空ネットワークにおいて需要および供給の双方を考慮した研究について、目的に応じて異なる研究がなされていることを説明する。その上で、LCCの参入を含めて航空政策を練るには新たな研究が必要であることを示す。第2章では、市場を表現するモデル構築のため、国際航空市場の基礎的分析を行う。第3章では、本研究で構築するモデルについて、モデルの全体構造、適用する理論、使用したデータ、計算方法について説明する。第4章では、構築したモデルによって、現実の一部分のネットワークにおいて計算を行い、LCCの参入によるモデルの反応を確認する。5章では、実際の航空ネットワークを対象として、複数のケースについて、LCCの参入や空港整備が旅客およびエアラインに与える影響を考察する。最後に、第6章では、本研究の結論と今後の課題について述べる。

1-2. 既往の研究と本研究の位置づけ

(1) 航空ネットワークに関連する研究の全体像

航空ネットワークの研究課題を、大きく三つに分けるとすると、「需要」に主眼を置いた研究、「供給」に主眼を置いた研究、そして、「需要」と「供給」の双方を考慮した研究である。ここで、需要とは旅客の行動、供給とはエアラインの行動を指す。各々の分野において、本研究と同様に実データから実証分析を行う研究を中心にレビューする。

(2) 「需要」に主眼を置いた研究

空港整備には巨額の費用がかかるため、整備に見合う需要があるか、前もって検討する必要がある。そのため、空港サービスレベル（発着枠や空港アクセス時間）を入力変数として需要予測を行う研究が多い。さらに、都市圏の交通需予測において広く使われている四段階推定法を適用することが一般的である。森知ら(1988)は、日本の国内航空路線を鉄道との機関分担率・路線距離をもとに九つにグループ化し、グループごとに需要を推計している。また、不均衡分析を用いることにより、需要予測に供給制約を考慮している。屋井ら(1996)は、東アジア圏域を対象として、空港整備による新規路線開設や便数増加が旅客の国際線経路選択に与える影響をネスティッドロジットモデルによって表現している。運輸政策研究機構(2001)と、これを改善した国土技術政策総合研究所(2005)は、旅客、貨物の双方について国内・国際市場それぞれの需要予測を行っている。ここでは、出発地と到着地間の輸送量、交通機関のサービスレベル、空港のサービスレベルを入力すると、各経路の輸送量が出力されるモデルが、四段階推定法とロジットモデルにより構築されている。

また、エアラインや航空機製造会社が企業戦略を練るに当たっても、需要動向を知る必要がある。一例として、Airbus 社は全世界の航空需要予測の結果を公表している。

以上のように、旅客だけの行動を表現する研究は実務上の必要性から、国策研究機関やエアラインが多くの研究を行っている。そのため、今後大学研究として重点的に扱う必要性は低い。

(3) 「供給」に主眼を置いた研究

航空ネットワークにおいてエアラインだけの行動を扱った研究の多くは、エアラインの運賃並びに費用を分析する。Brander and Zhang(1993)は米国エアラインの実データを使用し、限界費用が平均費用、市場距離、そして平均運航距離から推定されることを示した。村上(1994)は、コブダグラス型関数型を用い、国内航空会社の費用並びに運賃を推計している。その上で、国内航空会社には企業規模の経済性が存在する

が、路線密度の経済性が存在するか不明である、と示している。花岡(2007)は諸外国のLCCに着目し、低コスト化が可能な理由をビジネスモデルから分析した。ここでは、LCCの参入が遅かったヨーロッパやアジアに比べて、北米ではメガキャリアとLCCの間でビジネスモデルの差が小さいことを示した。またアジアのLCCは、LCC専用ターミナルを活用していることが特徴的だとしている。運輸政策研究機構(2007)は時系列データを用いて、北米におけるメガキャリアとLCCの供給コストを比較している。ここでは花岡(2007)と同様、メガキャリアとLCCの間で費用の差が縮まっていることを示した。さらにAlderighi(2004)はLCCが参入した市場において運賃の変化を分析している。ここで既存キャリアとLCCの運賃は市場における企業数によって変化し、さらに既存キャリア間の競争でビジネスクラス運賃とエコノミークラス運賃は非対象に変化するが、LCCと既存キャリア間の競争ではすべての座席クラスで運賃を低下させることを示した。

以上のように、エアラインだけの行動に関する研究は、理論モデルの構築も、実証分析も実績が積み重ねられている。そのため、結果は詳細なデータが得られるかどうか大きく依存し、研究の余地は少ない。

(4)「需要」と「供給」の双方を考慮した研究

旅客の行動とエアラインの行動の相互影響を扱う研究の多くは、航空市場を経済均衡モデルとして表現する。その中でKanafani and Ghobrial(1985)、Hansen(1995)は、実データを用いて分析を行った初期の研究である。これらはいずれもエアラインの利潤最大化と旅客の経路選択をそれぞれモデル化し、路線便数を変数として均衡を求めている。Kanafaniらは、米国国内航空旅客輸送市場を対象として、エアラインの路線設置行動がごく限られた空港に集中する、ハブ・スポーク型ネットワークとなることを理論的に示した。Hansenは、ハブ・スポーク型のネットワークを持つエアラインと直行便からなるネットワークを持つエアラインの競争を、非協力ゲーム理論を用いて記述化している。しかしこれらの研究では、モデルは運賃がエアラインの行動と独立して決定される構造のため、ネットワークの形状は分析できるが、経済的影響の評価については課題が残る。

同様の研究は寡占市場モデルが主であるが、厳密な経済理論に基づくモデル化の場合、データ制約や計算負荷のため現実的な大ネットワークへの適用が困難である。つまり、ネットワークの拡大は理論が精緻であることを代償とし、大きなネットワークで計算するとともにより多くの仮定が必要となる。ここで、大橋ら(1996)、大橋ら(1999)の一連の研究は、理論的に精緻なものである。これらは旅客の一般化費用最小化と複数の航空会社の利潤最大化、さらに空港管理主体の社会的余剰最大化を考慮し、リンク交通量・運賃・便数・空港使用料について、均衡諸変数を求めている。しかし、モデル構造が複雑であるため、数ノード以上レベルのネットワーク規模を対象とした

計算が困難という課題がある。そのため、エアラインは全て同質で、同一運賃を設定するという仮定を置いている。さらに大橋ら(2004)は羽田空港拡張の効果を実データから計算するに当たっても、空港管理主体の行動は外生であると仮定し、ネットワークも国内に9ノード・36路線であると単純化している。これに対し、竹林(2005)、竹林ら(2007)、石倉(2007)では、市場の分割と運賃の外生を仮定している。市場はゾーン間OD市場と都市間OD市場に分割され、前者でエアライン間の競争が、後方で旅客の路線選択が行われる。これにより、同時に解く制約条件が減り、ルート数が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。しかし運賃が外生であるため経済的影響の評価ができない。また計算の上で便数が0にならないとしているため、路線からの撤退は表現できないことが問題である。

その他、旅客の行動とエアラインの行動の相互影響を扱った研究には、エアラインの異質性を考慮した高田ら(1999)がある。ここではエアラインの異質性を費用関数によって設定し、異なる企業が市場に存在する際の市場形態を考察した。また、屋井ら(1998)はマイレージポイントなどによる旅客の囲い込みに着目した。ここで国際航空の利用頻度が高い旅客ほど、エアラインが旅客を囲い込む行動をとっていることを述べ、顧客獲得競争が進んだ際には、需要分析において囲い込みの効果を考慮する必要性を示した。

(5)本研究の位置づけ

航空ネットワークの研究課題のうち、「需要」に主眼を置いた研究と「供給」に主眼を置いた研究は、既に積み重ねられている。そして「需要」と「供給」の双方を考慮した研究は精緻な理論が出来上がっており、それを目的に応じて仮定を設定し、実ネットワークに当てはめる研究が多数行われている。ここで、既存の研究では運賃がすべてのエアラインに対して同一、もしくは外生であると仮定される。そのため、LCCが参入した場合の運賃変化および消費者が得る利益を算出することはできず、既存の研究ではLCC参入の是非を評価できない。

それゆえ、本研究では既存の研究成果である理論をもとに、LCCの参入を評価でき、かつ、実ネットワーク上で計算可能なモデルを構築する。ここでモデルは、安藤・大橋(2004)の考え方を踏まえた上で、エアライン別の運賃の差を表現できるものとする。その結果、LCCの参入を考慮して我が国の航空政策を考察する。

2. 国際航空市場の基礎的分析

本章では、国際航空市場における変化と日本における国際航空市場の現状を把握する。これにより、航空市場を表現するモデル構築のための着眼点を得る。

2-1. 規制から規制緩和へ

戦後の航空産業は、次の二つの理由から政府の規制によって保護されていた。一つは航空が国家の利害と深く結びつき、社会的に重要であるという理由で、もう一つは、航空産業には規模の経済性があり、政府の介入なしには企業が存続しないという理由である。ここで航空産業における規模の経済性とは、輸送密度の経済性と範囲の経済性の二つを指す。輸送密度の経済性とは便数に依存し、他産業の規模の経済性に当たるものであり、範囲の経済性とは路線数に依存するものである。これらの特色を航空産業が持つため、各国政府は特定の国内エアラインを保護し、また、国際航空市場においては海外エアラインとの住み分けを規定してきた。

日本における特定の国内エアラインに対する保護は 45/47 体制と呼ばれ、1972 年に始まった。これは三つのエアラインにのみ事業許可を与えた産業保護政策で、事業分野も限定したものである。各々のエアラインに与えられた事業分野は日本航空が国際線と国内幹線、全日空が国内幹線とローカル線、東亜国内航空（のちの日本エアシステム）が国内ローカル線であった。

また国際航空市場において、各国政府は国際民間航空条約（シカゴ条約）とバミューダ協定をモデルにエアライン間の住み分けを規定してきた。ここで、シカゴ条約は 1944 年に締結され、領空主権の確認や航空機の安全運航のために取るべき措置など、民間航空機の運航に関する国際的な基本原則を定めたものである。また、バミューダ協定は 1946 年にアメリカとイギリスの間で締結され、航空輸送サービスに関わる具体的な枠組みが二国間協定によって規定されることを定めたものである。各国政府は 1980 年代半ばごろまで、これらをもとに国際航空協定を締結し、規定は運輸権、路線、輸送力、運賃、企業など詳細に及んだ。

しかし市場が成熟するにつれて、かえって政府の介入が企業の成長および効率的な市場の形成を阻害する要因となり、規制緩和が始まった。その先駆けはアメリカで、特定の国内エアラインへの保護を取りやめる航空規制緩和法を 1978 年に制定した。これは国内市場の路線、運賃に関する規制を段階的に撤廃することを定めた法律で、新規エアラインの参入を促し、競争によるサービス向上および運賃低下をもたらした。さらに国際航空市場においても、アメリカは 1978 年にオランダとの二国間協定を輸送力の自由化・運賃設定の弾力化するものへ改め、その後も二国間協定の見直しを進めた。1990 年代以降は二国間協定そのものを自由化し、路線・輸送力制限の撤廃、運

賃の自動認可、航空会社の複数指定等を目指すオープンスカイ政策を展開している。

一方、日本においても 1985 年に 45/47 体制からの転換が決定し、特定の国内エアラインに対する保護が見直された。ここでは全日空および日本エアシステムの国際線への参入、国内主要線の複数社参入が決定した。さらに、2000 年の改正航空法では参入および運賃規制が緩和され、需給調整規制の廃止、路線免許制から事業許可制への変更、運賃許可制から事前届け出制への変更がなされた。これによって得られた効果は、新規参入による事業者数の増加、運賃体系の多様化と運賃水準の低下、さらに新規参入路線を中心とした旅客数の増加が挙げられる。

さらに、日本の国際航空市場におけるエアライン間の住み分け規制は、「航空自由化（アジア・オープンスカイ）」によって規制緩和が進んでいる。これは 2007 年 5 月に決定したアジア・ゲートウェイ戦略会議のアジア・ゲートウェイ構想に従っており、「航空自由化」とは二国間協定を弾力化することで事業会社、乗入地点、便数の制約をなくすことを指す。アメリカのように二国間協定を自由化するオープンスカイ政策ではなく二国間協定の弾力化することを選んだ背景には、首都圏空港の発着枠不足がある。ここでは、限られた発着枠を配分する権限を政府が握ることで、二国間協定を有利に進めることが考えられている。以上の規制緩和を受けて 2007 年 8 月には韓国との間で、2008 年 1 月にはマカオとの間で、わが国の首都圏空港関連路線を除き、相互に乗入地点及び便数の制限を撤廃し、航空自由化を実現することが合意された。この結果として 2007 年冬ダイヤには韓国企業により日本の各地方空港への増便がなされている。

2-2. LCC の登場

ここまで述べた規制緩和が、航空市場に与えた影響の一つとして LCC の参入がある。LCC は輸送量、参入、運賃に関する規制がなくなったことで、既存のエアラインとは異なるビジネスモデルで航空市場に参入している。日本でも国内航空市場においてスカイマーク、エアドゥといった LCC が存在するが、諸外国の LCC ほど低運賃ではなく路線網も高需要路線に限られている。ここでは日本において規制緩和が進んだ場合に参入しうる海外の LCC を考察する。

LCC の特徴的なビジネスモデルとして、図表 2 に挙げるような特徴が挙げられてきた。

ヨーロッパや東南アジアでは、これらの特徴を持っている LCC が多い。しかし多くの LCC が生まれるにつれてビジネスモデルも多様化している。マレーシアをハブとして路線を展開するエアアジアはこれまで LCC の参入が難しいとされてきた中・長距離路線へも参入している。また、アメリカの LCC には既存キャリアとビジネスモデルが

近づいているものがある。これらは乗継便を設定したり、マイレージプログラムを設定したりしている。

図表2 LCCビジネスモデルの特徴

製品特性	輸送サービス	低価格，高頻度，直行便，乗継なし
	流通	直接販売，チケットレス
	機内サービス	1クラス制 座席指定や機内食なし
	定時制	良い
運航特性	機材	1タイプ，高稼働率
	運航距離	平均800km以下
	空港	非混雑空港の使用
	従業員	競争的賃金，高生産性

2-3. 日本における国際航空市場の現状

日本には「国際拠点空港」と定義される空港が三つあり、それらは成田国際空港、関西国際空港および中部国際空港である。ここで現在事業実施中の空港を含め、空港の配置的側面からの整備は全国的に見ればできあがったものと考えられているため、国際拠点空港の新設は検討されていない。また、国際拠点空港は三大都市圏（首都圏、中部圏、近畿圏）に一空港ずつ配置されているため、一般空港を国際拠点空港として扱うことも検討されていない。それゆえ、現段階では国際拠点空港の数が増えることはなく、アジア・ゲートウェイ構想で提唱される地方空港の国際化は、既存空港の機能の拡充および高質化を指す。

日本の国際航空市場の特徴は、「平成 17 年度 国際航空旅客動態調査」（国土交通省）より次のとおりである。まず、平成 17 年度利用客 5651 万人のうち 81.2%にあたる 4,586 万人が成田および関西空港から出国する。ここで成田空港は東日本から、関西空港は西日本から主に利用されている。それに対して中部空港の利用客は中部を中心として関東から西日本まで広がっている。これは関東とは新幹線によって、遠方の九州・四国とも国内航空路線によって結ばれるためである。その他の空港のうち、福岡空港、仙台空港など地域の拠点空港は所在県及び周辺県から利用されている。中でも福岡空港は九州のみならず山口、広島からも多くの旅客を集め、東北や北海道からも利用されている。

II. 研究手法

3. 計量経済モデルの構築

3-1. モデル構築の基礎要件

2章で示された現在の国際航空市場の現状をふまえると、モデル構築に当たって、次の三点を考慮することが必要と考えられる。第一は、首都圏空港は発着容量不足から政府の規制の下におかれ、自由な路線設定が行われないことである。したがって、モデルでは、空港容量の制約を取り入れる必要がある。第二は、LCCには低運賃であるということを除いて多様な形態が存在することである。これに関して、本研究では、低運賃を費用が安いということによって表現することとする。第三に、旅客の出国空港は国際拠点空港のみならず地方の拠点空港も選択肢として挙げられることである。これは経路の設定に反映することとする。

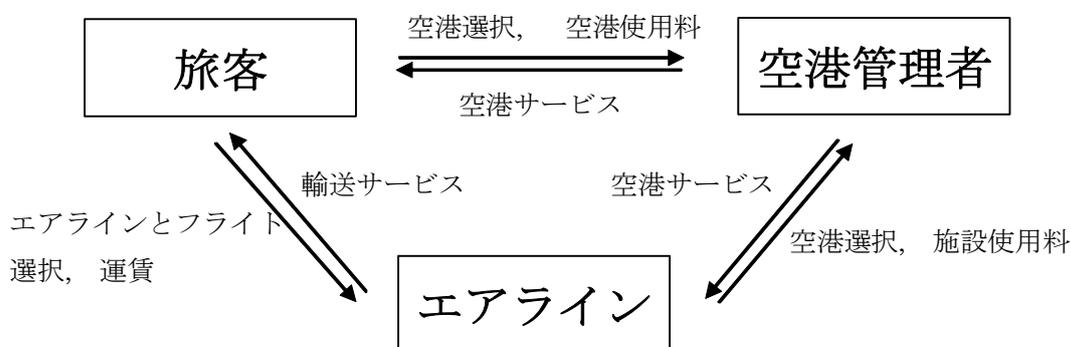
これらの基礎要件を前提として、以下では、国際航空市場においてLCCの参入や空港整備状況を入力した場合、出力としてネットワークの形、路線運賃・旅客数、各空港の国際線便数が得られる、計量経済モデルを構築する。

3-2. モデルの全体構造

航空市場を構成する主体には、旅客、エアライン、空港管理者（政府、自治体、管理会社のいずれか）の三つが挙げられる。これらの相互関係をまとめると、図表3のようになる。

ここで、空港管理者と他の主体の関係について、次のように考える。

まず、空港管理者と旅客の関係において、その際、空港使用料が与える影響は小さ



図表3 旅客、エアライン、空港管理者間の相互関係

い. なぜなら空港選択の主な要因は、目的地へのフライトの有無と居住地から距離の二つであり、エアラインが各空港に展開する輸送サービスに左右される。それゆえ、旅客の空港選択行動は、エアラインとフライトの選択に含まれると考えていい。その一方、空港管理者とエアラインの関係において、施設使用料を無視することはできない。実際にタイやシンガポールでは、空港管理者がローコストキャリア専用格安のターミナルビルを用意する、という行動が見られる。そこで本研究は、空港管理者の行動を所与とした複数のケースを用意し、ケースごとに比較する。ここで用意するケースは広域ブロック・ゲートウェイ政策をもとにする。

以上より、モデルに内生化する主体は旅客とエアラインの二つである。ここで、各主体を表すために仮定する行動原理は、以下のとおりである。

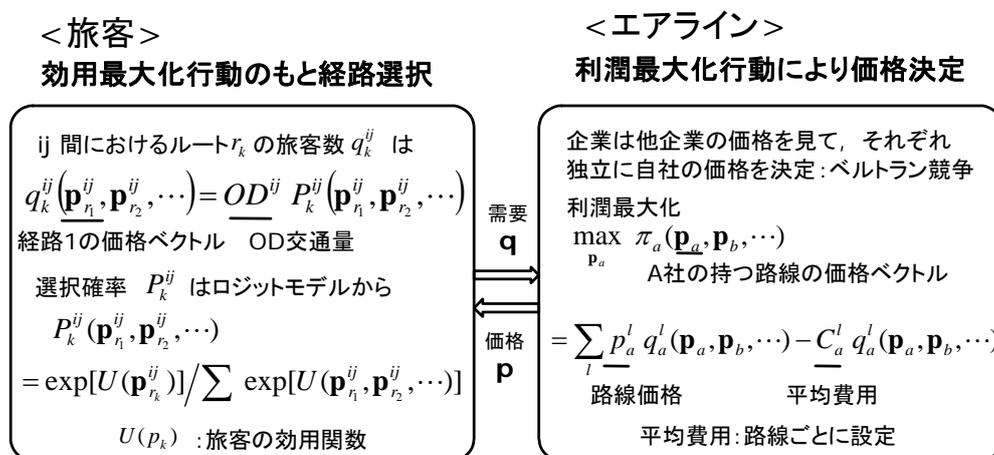
(1) 旅客: 利用するルートから得られる利便性(効用)に応じて、確率的な経路選択

ここで効用は、ルートを構成する要素（各エアラインが定めた運賃、時間、便数、乗り継ぎの有無）からなり、選好の優劣を決定する。つまり、効用を用いることでルートの比較が可能になる。今、一つの出発地と到着地の組み合わせに複数の経路があるとすると、旅客は一般化費用の比率に応じた確率で、それぞれのルートを選択する。

(2) エアライン: 利潤最大化と運賃競争

各エアラインは、旅客の行動によって決定された自社路線内の旅客需要を満たす条件のもと、自社の利潤を最大とするよう、各路線の輸送サービスレベル（運賃、提供座席数、便数）を決定する。ここで、複数存在するエアラインは、運賃競争の結果として利潤を最大化すると考える（ベルトランモデル）。これによって、各エアラインが生み出す財に相違（費用構造に対応した運賃差）が生じる。

両者の関係を図示したものが、図表4である。



図表4 旅客とエアラインの行動と相互関係

3-3. モデル

(1) ネットワークの定義

ノードとは空港や駅といった交通結節点，リンクとは二つのノードを結ぶ路線のことである．本研究ではノードは出発地，到着地，乗り換えノードという 3 種類を用意する．そして，全てのリンクは有効リンクである．また，ルートとは単なるリンクの組み合わせではなく，任意の OD 間を結ぶリンク・エアラインの組み合わせを指す．ルート全体がネットワークを構成する．

(2) 旅客の行動

旅客の行動原理は，利用するルートから得られる効用の最大化である．本研究ではロジットモデルによる確率的経路選択を用いて以下のように表す．

ある出発地 i と到着地 j を結ぶルート k における交通量 $x_{ij,k}$ は，

$$x_{ij,k} = OD_{ij} P(r_k) \text{ for } k \in R(i, j) \quad (1)$$

となる．ここで，

$$P(r_k) = \exp[U(r_k)] / \sum_{k' \in R(i, j)} \exp[U(r_{k'})] \quad (2)$$

であり，

$P(r_k)$: ルート k の選択確率

OD_{ij} : 出発地 i ，到着地 j に対応する交通量

$R(i, j)$: 出発地 i ，到着地 j を結ぶルートから成る集合

$U(r_k)$: ルート k を利用したときの効用．ルート k を構成する路線・企業の所要時間ベクトル，運賃ベクトル，便数ベクトル及びその他のサービスレベルを表す指標の関数である．ここで空港の便数制約を考慮するために，所要時間には空港混雑に応じたフライト遅延時間が含まれると考える．

(3) エアラインの行動

エアラインの行動原理とした運賃競争による利潤最大化を，以下のように表す．航空会社 a の利潤 π_a は，

$$\max_{p_a^l, l \in L(a)} \pi_a = \sum_{l \in L(a)} \{p_a^l x_a^l - C_a(x_a^l)\} \quad (3)$$

ただし,

$L(a)$: エアライン a が運航するリンクの集合

p_a^l : リンク l の運賃,

x_a^l : リンク l の旅客数

$C_a(x_a^l)$: 企業 a の費用関数 (空港使用料を含む)

を表す.

このとき, 利潤最大化のための一階条件は, 限界費用 MC_a^l を用いて,

$$\frac{\partial \pi_a}{\partial p_a^l} = x_a^l + \sum_{l' \in L(a)} \left\{ p_a^{l'} x_a^{l'} \frac{\partial x_a^{l'}}{\partial p_a^l} - MC_a^{l'} \frac{\partial x_a^{l'}}{\partial p_a^l} \right\} = 0, \quad p_a^l \in L(a) \quad (4)$$

となる.

また, 便数 f_a^l は旅客数 x_a^l および一便当たりの旅客数によって決まると仮定する.

ここで一便当たりの旅客数とは, 所与の機材容量 V_a^l , 所与のロードファクター LF_a^l を掛け合わせたもので, リンクごとに固有のものである.

$$f_a^l = x_a^l / V_a^l LF_a^l \quad (5)$$

上記の等式は, リンクごとにロードファクター一定だと仮定している. これは, エアラインが利潤最大化を達成するならばロードファクターを最大値に近づける経営が行われるため, 大きく変化することがないと考えるためだ.

(4) 市場の未知変数と均衡条件

ルートの総数を R, 航空会社数を A0, リンク数を L とおく.

未知変数は旅客が R 個の $x_{ij,k}$, R 個の $P(r_k)$, エアラインが L 個の p_a^l であり, 計 $2R+L$ 個である. それに対し, 条件式は旅客が R 本の式(1), R 本の式(2), エアラインが L

本の式(4)であり，計 $2R+L$ 本である．つまり，これまで構築したモデルは条件式と未知変数の数が一致する．

3-4. モデルの計算方法

構築したモデルを数値計算する手法の概略を示したものが図表4である．また計算に使用したプログラムの構成を付録1に示す．

アルゴリズムは旅客とエアラインの間の均衡と，各エアライン間の均衡の二つに分かれる．

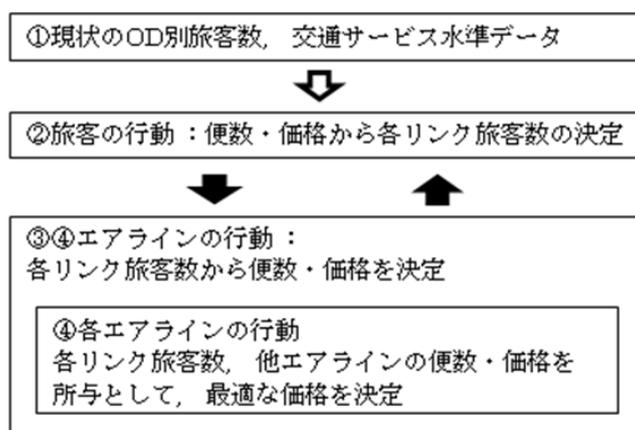
初期値として，現状のOD別旅客数と交通サービス水準データを用いる．前者は「平成17年度 国際航空旅客動態調査」(国土交通省)を，後者は「JTB時刻表 2005年10月」を使用する．旅客とエアライン間の繰り返し計算Aを始める．旅客は各ルートの旅客数を，エアラインは自社リンクの運賃・便数を決定する．

まず，旅客については，ロジットモデルにより各ルートの旅客数を決定する．ここで，エアラインの交通サービス水準の差が各ルートの効用に反映されるように，航空ルートはエアライン別に設定する．つまり，同一路線でもエアラインが異なるなら別ルートとする．効用に応じてルートごとに配分される旅客数をリンクごとに数え上げ，それをエアラインに受け渡す．

次に各エアラインは，②の自社リンクの旅客数を所与として，自社リンクの便数を決定する．ここで便数は，ロードファクターと機材容量から求められる．

エアライン間の繰り返し計算Bを始める．ここで，利潤が最大となるように自社リンクの運賃を決定する．そのとき，各エアラインは他者リンクの運賃・便数および②の自社リンクの旅客数を所与として計算する．

繰り返し計算Bは，一つ前の計算結果とリンク運賃の差が十分小さくなる，もしくは



図表5 モデルの全体構造

は利潤をさらに高くする運賃が近傍に見つからない場合に収束したとみなす。そこで得られた各リンクの運賃と③で計算した便数を、繰り返し計算 A に戻って旅客に受け渡す。繰り返し計算 A は、一つ前の計算結果とリンク旅客数の差が十分小さくなる場合に収束したとみなす。

3-5. 使用するデータ

モデルを数値計算するに当たり使用したデータをまとめる。ここでデータの選択および加工方法は、国土技術政策総合研究所(2005)の国際航空旅客需要予測法に従う。

(1) データ収集の対象

本研究の分析対象は、日本各地と東アジアを結ぶネットワークである。それに従いデータ収集の対象は、東アジア方面へ国際定期便のある空港の、国際航空路線を利用する出入国日本人及び出入国外国人とした。また、日本人は観光・業務等目的の二区分、外国人は全目的の一区分とする。

(2) ゾーニングと需要データ

国内ゾーンは、北海道を四分割した都道府県単位で 50 ゾーン設定する。海外ゾーンは、全世界を 32 地域に分割し、その中でも需要が多い 12 ゾーンを用いる。需要データは、「平成 17 年度 国際航空旅客動態調査」を用いた。(国土交通省航空局) 海外ゾーン区分とその旅客数を以下に示す。

(3) 交通サービス水準データ

(a) ゾーンの中心と経路の起終点

日本国内 50 ゾーンのゾーン中心は、都道府県庁があるゾーンは都道府県庁、都道府県庁がないゾーンは人口が最大の市区の市区役所とした。一方、海外側のゾーンの中心は設定していない。そのため経路の起終点は、日本のゾーン中心から海外ゾーンにおける代表空港までとした。海外のゾーンの設定は、図表 6 に示されるとおりである。

(b) 国際航空リンクの加工

一つの海外ゾーンには、日本路線が開設された空港が複数存在する。したがって、所要時間・運賃の算定では、代表空港を一つ選定して、当該空港までの所要時間・運賃として設定した。ただし、便数は複数空港への便数の合計とした。

(c)空港までのアクセス交通機関

空港までのアクセスは、現実には複数の交通機関を組み合わせることもある。しかし、空港への行きやすさは空港と直接つながる交通機関、すなわち最後に使った交通機関によって代表されると考えることができる。よって、空港までのアクセス交通機関は最終交通機関で定義する。

図表6 海外ゾーン区分と旅客数

区分	対象国・地域	代表空港	出国旅客数 (人/週)
中国遼寧	遼寧省	大連	6225
中国北京	北京市・天津市・河北省	北京	12191
中国上海	上海市	上海	26051
中国広東	広東省	広州	6899
香港	香港	香港	24793
台湾	台湾	台湾	42612
韓国	韓国	仁川	76451
マレーシア	マレーシア・ブルネイ	クアラルンプール	6618
インドネシア	インドネシア	デンバサル	7444
シンガポール	シンガポール	シンガポール	11548
タイ等	ベトナム, ラオス, カンボジア, タイ, ミャンマー	バンコク	30459
フィリピン	フィリピン	マニラ	11621

図表7 交通サービス水準データの一覧

機関	変数	設定方法
航空	所要時間	2005年10月の時刻表による
	運賃	2005年10月の時刻表の通常期の大人普通運賃
	乗換時間・待ち時間	以下を最小乗換時間とした。 国際航空と各交通機関:90分 国内航空と各交通機関:搭乗時40分, 降機時20分
鉄道	所要時間	2005年10月の時刻表による
	運賃	2005年10月の時刻表の通常期の大人普通運賃
	乗換時間・待ち時間	最小乗り継ぎ時間は10分/回
バス	所要時間・運賃	2007年10月の時刻表による
	乗換時間・待ち時間	最小乗り継ぎ時間は10分/回
自動車	所要時間・運賃	以下の速度で設定 高速道路:80km/h 一般有料道路, 都市高速:40km/h 国道・県道・その他:30km/h
	休憩時間	走行距離×(30分/200km)で算定
	高速道路料金	23円/km×高速道路距離+150円で算定
		平均乗車人員1.7人/台
	走行経費	22.26円/台km×走行距離 平均乗車人員1.7人/台
	乗換時間・待ち時間	航空との乗り換え時間は上記

(d)空港までのアクセス交通機関

各交通機関の交通サービス水準データの一覧は、図表7のとおりである。

3-6. 旅客の行動の計算

旅客の行動については、国土技術政策総合研究所(2005)の国際航空旅客需要予測法における航空経路選択モデルおよび空港アクセス交通機関選択モデルを適用した。ここで、旅客の行動は空港アクセス交通機関選択の結果を踏まえて航空経路選択を行う、ネステッド型の非集計ロジットモデルで表される。

(1)ルートの設定方法

ルート設定の要件は二つある。一つは、すでに定義したように、ルートが任意のOD間を結ぶリンク・エアラインの組み合わせであることである。これは、エアラインごとに別々のリンクを設定することで達成される。もう一つは、出力として国際航空ネットワークの形が得られるようにすることである。これは、一つのODペアに対して出国空港の異なる複数ルートを設定することで達成される。なぜなら複数ルートを設定することで、エアラインのサービス水準によってどの空港が出国空港として選ばれるか、すなわちネットワークの形状変化が表現できるためだ。ここでは一つのODペアに対し、成田、関西、中部、羽田、その他の2空港の計6個を設定する。ここで、その他2空港の選択は国際航空旅客動態調査、図表4-16居住地別出国空港構成による。成田、関西、中部、羽田以外で出国者の多い上位2空港を選択する。

以上より、一つのODペアに対しエアライン別・出国空港別の経路がルートされる。

(2)リンクの種類

本モデルでは、一つのルートが3種類のリンクから構成されるとする。リンクの種類は、アクセス、国内ラインホール、国際ラインホールである。

●アクセス：出発地から同一府県所在の最寄り幹線ターミナル（空港または駅）までの区間。ただし、3大都市圏内は同一府県とみなす。国内航空はアクセスとして取り扱わない。

●国内ラインホール：最寄り幹線ターミナルから出国空港までの区間。国内航空や新幹線等は国内ラインホールとして扱う。

●国際ラインホール：出国空港から海外ゾーン（空港）までの国際線による区間

このように区分したアクセスは、アクセスは最寄り幹線ターミナルが空港の場合にのみ評価され、空港アクセス利便性を評価するために用いる。方法としては 空港アクセス交通機関選択モデルによってアクセシビリティ指標を算出した上で、航空経路

選択モデルの説明変数に加える。これにより、アクセシビリティ指標で評価するアクセスは、航空の利用が国内ラインホールのためか、国際ラインホールのためかに関係なく、また、最寄り幹線ターミナルが鉄道駅の場合には、その鉄道駅までのアクセス利便性は評価しない。

(3) 航空経路選択モデルの効用関数

旅行者の効用関数 $U(r_k)$ は、航空経路選択モデルから次式で算出される。

$$\begin{aligned}
 U(r_k) = & \beta_1(\text{国内ラインホール所要時間}) + \beta_2(\text{国内ラインホール費用}) \\
 & + \beta_3(\text{国際ラインホール所要時間} + \text{フライト遅延時間}) \\
 & + \beta_4(\text{国際ラインホール費用}) + \beta_5 \ln(\text{国際航空線便数}) \\
 & + \gamma(\text{アクセシビリティ指標 1})
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

ここで、

$$(\text{アクセシビリティ指標 1}) = \ln \left\{ \sum \exp(V_2) \right\}
 \tag{7}$$

である。

(a) ラインホール所要時間

ラインホール所要時間（分）は、当該経路において、航空をはじめとするラインホール交通機関の最短所要時間である。この際、交通サービス水準データの一覧で示した乗換待ち時間が含まれている。国際航空について、一つの国内空港から一つの海外方面には複数の路線があることから、代表路線を設定し、当該路線の最短所要時間とした。さらに、国際ラインホール時間は空港混雑によるフライト遅延時間を含む。

(b) アクセシビリティ指標 1

国内ゾーンから空港へのアクセシビリティ指標として、空港アクセス交通機関選択モデルから得られる V_2 のログサム変数を用意し、これを取り込むこととした。また、幹線ターミナルが空港ではなく鉄道駅るとき、アクセシビリティ指標はとりこまない。ここで算出したアクセシビリティ指標 1 ならびに算出方法は補遺に示す。

(c) パラメータ群 β, γ

日本人観光・業務等目的の二区分、外国人全目的の一区分に対して、それぞれ設定する。国土技術政策総合研究所(2005)によって推計された図表 8 に示されるパラメータを用いる。

図表8 航空経路選択モデルのパラメータ

	日本人観光		日本人業務等		外国人	
	係数	t値	係数	t値	係数	t値
国内ラインホール時間(分): β_1	-1.18E-02	-18.5	-9.59E-03	-14.4	-7.91E-02	-12.0
国内ラインホール費用(円): β_2	-2.09E-04	-24.2	-2.24E-04	-23.0	-2.08E-04	-23.1
国際ラインホール時間(分): β_3	-1.79E-03	-1.4	-1.17E-03	-1.0	-1.40E-03	-1.0
国際ラインホール費用(円): β_4	-1.22E-05	-4.5	-7.71E-06	-2.7	-8.67E-06	-2.8
ln{国際線便数(便/週)}: β_5	1.04E+02	23.5	1.14E+00	24.6	6.78E-01	18.6
アクセシビリティ指標: γ	4.07E-01	3.1	4.51E-01	2.4	5.88E-01	2.5
国内時間価値(円/h)	3397		2567		2282	
国際時間価値(円/h)	8802		9100		9695	
尤度比	0.39		0.39		0.39	
的中率(%)	91.6		91.8		91.8	
サンプル数	5447		5373		4868	

(4)フライト遅延時間の導出

空港混雑によるフライト遅延時間を表現する手法は、アメリカおよびヨーロッパの実データを用いてフライト遅延時間を推定した Donohue and Laska(2000)にならう。これは「福岡空港の総合的な調査 PI レポート ステップ1」において、福岡空港におけるフライト遅延時間が Donohue and Laska(2000)のモデルによって説明されているためである。

フライト遅延時間の算定式は以下のとおりである。

$$(\text{フライト遅延時間}) = \frac{(\text{空港容量使用率})}{1 - (\text{空港容量使用率})}$$

ここで、フライト遅延時間は分で表される。また、空港容量使用率の算出には各空港の滑走路処理容量が必要となる。我が国の空港では混雑空港に指定されている羽田空港、成田空港、伊丹空港、関西国際空港（第一期工事終了段階）および空港整備のための総合調査が行われている福岡空港、那覇空港において滑走路処理容量が示されている。本研究ではその他の空港について発着容量が十分であると仮定し、国際線の就航している羽田空港、成田空港、福岡空港、那覇空港においてのみ、フライト遅延時間を算出する。以下に、各空港の滑走路処理容量ならびにその出典は図表8に示されるとおりである。

3-7. エアラインの行動の計算

(1) リンクの設定方法

本研究では、エアラインの国際航空市場における行動のみに着目する。すなわち、エアラインが運航する路線のうち国内線の運賃は所与として、国際線の運賃決定行動だけを表現した。これは、国内線では鉄道などの代替交通機関およびエアライン間の競争だが、国際線はエアライン間の競争のみであるため、運賃決定行動を別々に考える必要があるからである。

また、利潤を最大化する運賃を決定するに当たり、準ニュートン法のアルゴリズムを用いる。

(2) 一便当たり旅客数の推定

リンクの便数はそのリンクの旅客数に応じて決定される。この際用いる一便当たりの旅客数は、現実の運賃と便数を入力した場合に得られる旅客数を、そのリンクの便数で除することによって求める。つまり、式(5)を変形した次の式(8)によって機材容量とロードファクターを設定する。この値は繰り返し計算において一定であるとする。

$$V_a^l LF_a^l = x_a^l / f_a^l \quad (8)$$

(3) 各エアラインの費用関数の設定

費用については、Brander and Zhang(1993)より a 社のリンク 1 における限界費用 MC_a^l を以下のように設定する。

$$MC_a^l = cpm_a (DIS_k / AFL_a)^{-\theta} DIS_k \quad (9)$$

ここで、

cpm_a : ユニットコスト (一人当たり, 一マイル当たりの費用)

DIS_k : ルート k の距離

図表9 各空港の滑走路処理容量

	滑走路処理容量	出典
成田空港	274	平成14年度 国土交通白書
羽田空港	458	国土交通省 羽田空港発着容量の考え方について
福岡空港	397	福岡空港の総合的な調査 PIレポート ステップ1
那覇空港	375	那覇空港の総合的な調査 調査報告書2 第5章

※滑走路処理容量は日当たり便数

AFL_a : a 社の平均飛行距離

θ : ユニットコストの距離弾力性. ここでは米国エアラインで計測された 0.5 を用いる.

である.

さらに, 限界費用が可変費用に等しいとして,

$$C_a(x_a^l) = cpm_a (DIS_k / AFL_a)^{-\theta} DIS_k x_a^l \quad (10)$$

とする. これは, 総費用が総生産量 (旅客数×距離) に対して逓減するという規模の経済性を満たす.

エアラインの設定は既存キャリアとして JAL を, LCC としてはアメリカで代表的なサウスウェスト航空とマレーシアを中心にアジアで勢いを持つエアアジアを想定する. 各エアラインのユニットコストと平均飛行距離を以下に示す. ここでユニットコストは運輸政策研究機構(2007)において示されている 2003 年から 2005 年の平均値であり, 平均飛行距離は各エアラインのホームページから入手した値である.

図表 10 各エアラインを表す指標

	ユニットコスト(cent)	平均飛行距離(mile)
JAL	15.64	634
サウスウェスト	8.79	580
エアアジア	3.83	676

III. 成果内容

4. モデルによるシミュレーション分析

ここでは、日本と上海とを結ぶ路線を対象として、3章で構築したモデルを用いたシミュレーションを行う。上海線を選んだ理由は、2005年時点で日本の16空港と路線を持ち、多様な出国空港選択行動を含むからである。これにより、出国空港の選択を現状とLCC参入後および航空施策後との間で比較できる。

シミュレーションの前提条件を示した上で、LCCの参入と成田空港への乗入れ規制が及ぼす影響を分析した結果を示す。ここで成田空港への乗入れ規制を考慮する理由は、容量不足から成田空港への乗入れが制限されている現実を反映するためである。

4-1. 前提条件

(1) ネットワークの設定

前章で設定したノード、リンク、ルートの定義およびデータを用いる。ここでは50個の出発地と1個の到着地（上海）が、各出発地と到着地の組に対して6個の経路で結ばれるネットワークを用いる。

(2) フライト遅延時間について

このシミュレーションでは、上海線の増減のみに応じてフライト遅延時間を決定する。つまり、他到着地の路線が増減した場合の影響は考慮していない。この場合、各空港の便数がシミュレーションの結果大きく変動するならばフライト遅延時間によって便数制約を表現できなくなる。しかし、今回のシミュレーションにおいて大きな便数変動はないことが確かめられたため、上海線にのみ着目してフライト遅延時間を決定する。

(3) 一便当たり旅客数の推定

実際の運賃と便数から計算した旅客数より、一便当たりの旅客数は図表11のように推定された。この際、市場にはエアラインが2社存在すると仮定し、各社の便数は現状の総便数を等分した値とした。

推定された一便当たり旅客数は、成田・関西で大きく地方空港で小さいという性質が顕著に表れており、現実を反映しているといえる。ただし、福島空港と長崎空港では推定値が小さく、改良の余地がある。

図表 11 上海線の一便あたり旅客数

出発空港	旅客数(人/週)
成田	155.6
関西	116.3
名古屋	91.3
福岡	63.4
新千歳	98
仙台	65.5
福島	45.3
新潟	85.1
小松	94.8
岡山	48.9
広島	63.7
松山	53.6
大分	62.8
長崎	52.4
鹿児島	89.4
那覇	85

(4) エアラインの設定

現状が JAL と同じ費用関数を持つ既存キャリア 2 社の複占だと仮定し、参入する LCC にはアメリカのサウスウエスト航空と同じ費用関数を与える。また一便あたり旅客数は既存キャリアと LCC との間で同数とする。

4-2. シミュレーション結果

まず、現状の運賃、便数、そして推定された一便あたりの旅客数を用いて、最適な運賃と便数、旅客数を決定した。これを基準ケースとして、LCC の参入や航空政策を表したケースと比較を行った。ここでは各ケースの概略、計算結果およびケース間で比較した結果を示す。

(1) 各ケースの概略

LCC の参入と成田空港への乗入れ規制を考慮した三つのケースを用意した。以下にケースの詳細を示す。ここで「すべての国際路線」とは、現状として上海線が運航されている路線のことを指す。

● ケース 0 : 現状ケース

現状の運賃、便数、現状から推定された一便あたりの旅客数を用いた基準ケースである。既存キャリア 2 社が路線を運航する状態を表す。

●ケース1：すべての空港にLCCが参入可能

既存キャリア2社が路線を運航する中で、LCC1社がすべての空港に参入できる状態を表す。

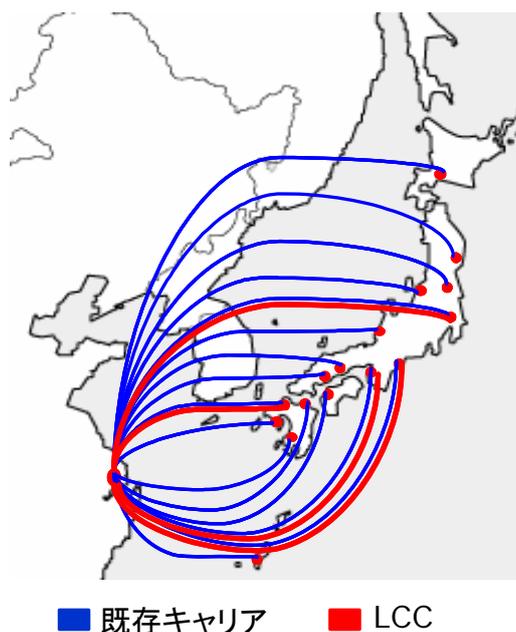
●ケース2：成田空港を除くすべての空港にLCCが参入

成田空港において容量不足から乗入れが規制されている現状を反映する。既存キャリア2社が路線を運航する中で、LCC1社が成田空港を除くすべての空港に参入できる状態を表す。

(2)ケース1，ケース2の計算結果

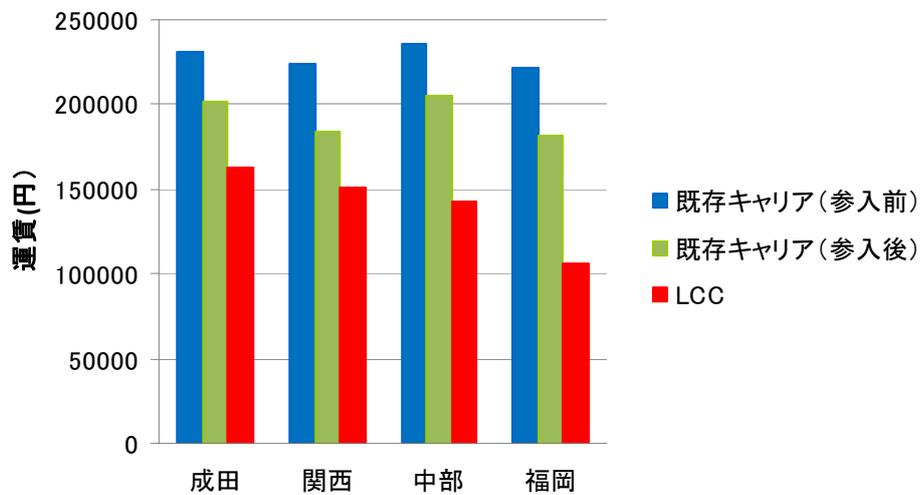
まず、シミュレーションの結果、図表12で示されるように、ケース1では、LCCが1便以上就航した路線は、成田、関西、名古屋、福岡の4空港のみであることがわかった。これは、LCCが、メガキャリアと同様のいわゆるハブアンドスポーク型ネットワークを形成していることを意味する。

図表13は、ケース1でLCCが参入した路線における運賃を、キャリア間で比較した



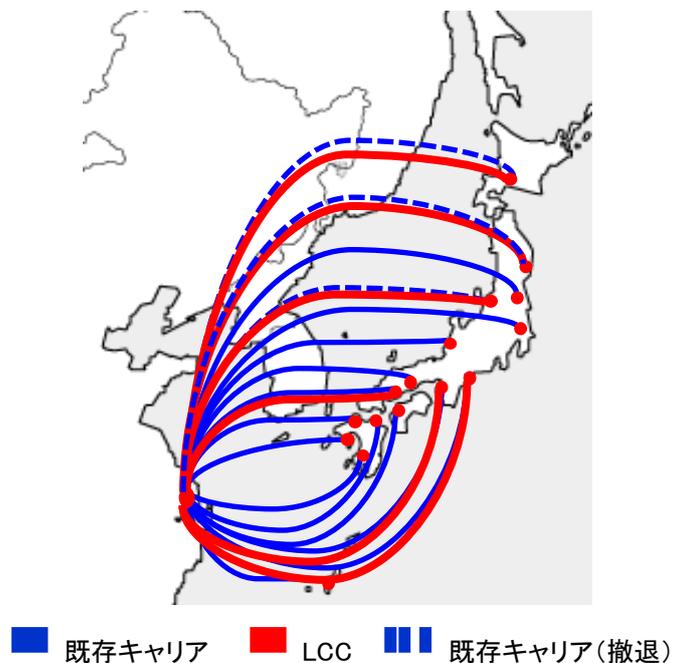
図表12 ケース1において各キャリアが運航する路線ネットワーク

ものである。LCC参入によって、これらの路線では、既存キャリアを含めて、参入前より大幅な運賃の下落が見られることがわかる。これは、低運賃のLCCが参入することによって、メガキャリアも顧客獲得のため運賃を引き下げたことによる。また、いずれの路線についても、LCCの運賃は、メガキャリアよりも低い運賃を設定していることもわかる。これは、明らかにLCCの方が、メガキャリアよりも平均運航コストが低いことが原因である。



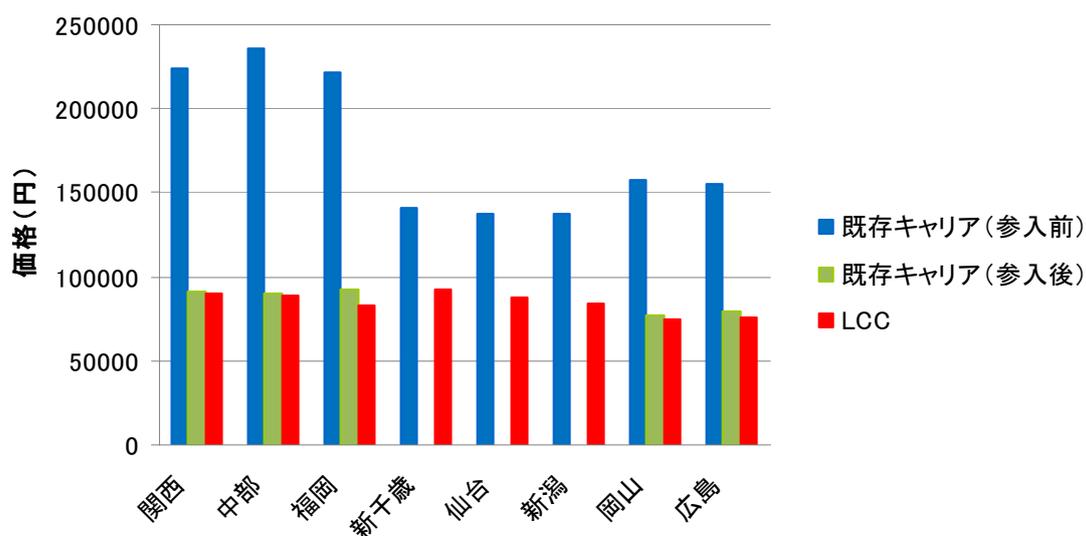
図表 13 ケース0とケース1との各路線のキャリア間運賃比較

次に図表 14 で示されるように、ケース 2 では LCC が 1 便以上就航した路線は、関西、名古屋、福岡、新千歳、仙台、新潟、岡山、広島の 8 路線であることがわかった。ここでは、ケース 1 において LCC が参入したハブ機能を持つ空港に、その他 5 個の地方空港が加わっている。これは LCC が成田空港に乗入れできないことで旅客をハブ空港に集約する力は弱まり、地方から直接旅客を運ぶポイントトゥポイント型ネットワークを選択したことを意味する。



図表 14 ケース1において各キャリアが運航する路線ネットワーク

図表 15 は、ケース 2 で LCC が参入した路線における運賃を、キャリア間で比較したものである。ケース 1 と同じく、LCC が参入した路線では既存キャリアを含めて、参入前より運賃が下落している。しかし、新千歳、仙台、新潟と上海を結ぶ路線では他路線と比べて LCC 参入による価格の下落幅が小さいことがわかる。これは、これらの路線において既存キャリアが LCC との競争の結果撤退したことが原因であり、LCC が独占的に運航し、高めの価格を設定しているためと考えられる。



図表 15 ケース0とケース2との各路線のキャリア間運賃比較

(3) ケーススタディの分析結果(ケース0とケース1およびケース2の比較)

現状を表現したケース0とケース1およびケース2を比較した結果、以下のことが明らかになった。

まず、ケース0を基準として、ケース1、ケース2の利用者便益(消費者余剰の差)、総利潤の差、社会的余剰の差をそれぞれ示したものが、図表16である。これより、第一に、LCC参入によって正の利用者便益が生じることがわかる。これは、既存キャリアも含めて運賃が下落し、選択する路線数も増えたことによる。また、特にケース2では、地方部から海外、あるいは海外から地方部に旅行する人々が、いったんハブ空港を経由して遠回りすることなく、直接往来できるようになったため、乗換の負担や旅行時間が軽減されたことが、寄与しているものと思われる。第二に、供給者の総利潤は減少することがわかる。これは新たなエアラインが参入したことで競争が激化したことによる。第三に、LCCの参入によって生じる利用者便益が総利潤の減少額を上回り、社会的余剰が拡大することがわかる。第四に、利用者便益を、両ケースで比較すると、ケース2の方がケース1よりも大きいことがわかる。これはケース2では、

図表 16 ケース 0 を基準としたケース 1 およびケース 2 の比較

	利用者便益	総利潤の差	社会的余剰の差
ケース1-ケース0	1.68E+09	-1.48E+09	2.03E+08
ケース2-ケース0	3.05E+09	-2.97E+09	7.60E+07

LCC がポイントトゥポイント型ネットワークを選択したことによって、多くの路線に参入したことにより、旅行者の交通時間と乗換が削減されたことによるものと思われる。第五に、総利潤の減少額を両ケースで比較すると、ケース 2 の方がケース 1 よりも大きいことがわかる。これは LCC が成田空港に参入できないため利潤が減ること、既存キャリアがより多くの路線で LCC と競合するために利潤を失うことによる。最後に、社会的余剰はケース 1 の方がケース 2 より大きいことがわかる。

以上より、ケース 2 のように成田空港への LCC 参入制限を設けることによって、社会全体としての厚生水準は低下する一方で、地方部居住者あるいは地方部へ旅行する外国人にとっては、利便性が向上し、利用者全体としても大きな便益が得られることがわかった。

(4)分析結果に対する考察と政策上の示唆

まず、国土形成計画で提案されているゲートウェイ政策の観点から、これらの結果を解釈すると、次のような点を指摘できる。第一に、成田空港への乗り入れ制限が課されている現状が維持されるならば、LCC は一部の地方空港路線へも参入するインセンティブを持つことが明らかとなった。したがって、首都圏、関西圏、名古屋圏以外の広域ブロック圏が、それぞれゲートウェイ空港整備を行うことによって、ポイントトゥポイント型の航空サービスを促進させ、結果としてブロック圏の国際交流を活性化できる可能性がある。第二に、成田空港への乗り入れ制限が課されなかったり、成田空港の容量拡大、あるいは羽田空港の国際化による首都圏としての航空容量の拡大が実現したりした場合には、LCC といえども、メガキャリアと同様の首都圏の空港をハブとするハブアンドスポーク型ネットワークを構築する可能性が示唆された。この場合には、首都圏、関西圏、名古屋圏以外のブロック圏が空港整備を行っても、現状とそれほど大きな変化が見込めない可能性がある。

これらの結果を総合すると、国土形成計画の観点からは次のような点を考察することが可能である。仮に、各ブロック圏の独立した地域交通政策を行うものと仮定するならば、ブロック間で一種の空港整備競争が発生する。ここで、中央政府がこの競争に関して何らかのコントロールを行わない場合には、人口が多く集積し、投資余力の最も大きい首都圏、関西圏、名古屋圏の空港整備が、早期かつ確実に行われることであろう。その場合、上の分析でも示されるように、これら大都市圏以外のブロック圏は、ゲートウェイとなる空港を整備してもあまり効果が得られない可能性がある。そ

の結果として、国際交通へのアクセシビリティに関して、ブロック圏間で格差が生じる可能性があり、本来、国土形成計画の目標としていた、東アジア諸国との密接な連携への障害となりうる。逆に、各ブロック圏と東アジアとの交流を促進することを最優先するならば、中央政府は、ゲートウェイ政策に関してある程度のコントロールを行う必要があるものと思われる。

今後も、規制緩和と地方分権の流れが継続することが予測される。そうした中で、国際航空政策の観点から、中央政府と各ブロック圏の役割のあり方についてさらなる検討を行うことが必要である。

5. まとめ

5-1. 結論

本研究は、日本各地と東アジアを結ぶ国際航空市場を対象として、旅客およびエアラインの行動を考慮した計量経済モデルを構築した。このモデルは、次のような特徴を持つものである：

- (1) 旅客の効用最大化行動をもとにした経路選択行動を表現できる。
- (2) エアラインの利潤最大化行動をもとにした運賃決定行動を表現できる。
- (3) 異なるエアライン間での運賃を巡る競争をベルトランナッシュ均衡によって表現できる。
- (4) 航空市場の需要側である旅客の航空経路選択モデルと、供給側である均衡運賃算定モデルとから、需給が一致する均衡状態を表現できる。
- (5) 東アジアの航空市場を表現するための現実のネットワークを想定している。

次に、構築されたモデルを用いて、上海と日本国内の空港とをつなぐ路線を対象としたケーススタディを行い、LCC が参入した場合に、既存キャリアや旅客に与える影響を分析した。これにより、LCC 参入に制限がない場合には、LCC の参入は、特定の大規模空港のみに限られること、成田空港への参入が制限されるなど、空港参入の制限が設けられる場合には、LCC は地方空港にも参入しうることがわかった。また、消費者余剰ならびにエアラインの利潤に関する分析を行うことによって、参入制限を設けない場合には、参入制限を設ける場合と比べて、高い社会的余剰が得られるが、消費者余剰は低くなることが判明した。この結果より、

5-2. 今後の研究課題

本研究では多くの仮定を前提としており、これらの結果への影響は否めない。さらなる発展には、航空市場をより正確に把握する必要がある。以下に、現時点で考えられる課題を示す。

(1) エアラインの機材容量およびロードファクターの考慮

本研究では、エアラインの機材容量は現実のデータから推定したのち固定とした。しかし実際には輸送量に応じた使用機材の変更も考えられるため、使用機材決定メカニズムをモデルに加える必要がある。

(2) 運賃および費用の検討

路線ごとに、運賃または費用のいずれかを知ることができれば、もう片方はエアラインの行動から推定できる。しかし、運賃は日ごとに設定されるものもあるほど複雑で、路線ごと費用もデータが乏しい。そこで竹林 18 のようにエアラインが路線においては輸送量のみを決定し、路線をまとめたゾーン間で運賃を決定する、といったモデルの改良が必要である。

(3) エアラインによる旅客の囲い込みの度合

マイレージプログラムなどによる旅客の囲い込みは、エアラインの選択に大きな影響を持ち、LCC と既存キャリアの競争を表現する際にも有効である。旅客の経済水準がマイレージプログラム加入を表すと考えられるため、現在ビジネスと観光という目的別で分けられている旅客を、経済水準別で分けることも検討すべきだ。

(4) 空港管理者の行動

本モデルでは、空港管理者の行動が外生となっている。しかし、実際には空港管理者による空港利用率上昇のための行動原理が働いていると考えられる。これを

(5) 使用データおよび計算量の少ないモデルの検討

本モデルでは、旅客需要が便数と運賃の関数になっている。ここで需要という「量」が、同じく「量」である便数によって決定されることはモデルにおける計算を困難なものにする。これは需要の増加が便数を増加させ、さらに便数の増加が需要の増加を生むという繰り返しを排除できないためだ。そのため、需要を運賃のみで推定すること、または便数を運賃で表すことが必要である。さらに、航空市場を表現する精緻なモデルは存在するが、データ整備と数値計算に多大な労力を必要とする。それゆえ、航空市場の特性を把握しつつモデルを単純化する仮定が必要である。

(6) 旅客の需要変動

上記のとおり旅客需要は繰り返し計算によって増え続ける傾向を持っているため、需要を変動型にすると解が不安定になる。そのため本モデルでも試しはしたが実際に使用しなかった。しかし、需要の変動はとりわけ新規需要を開拓する LCC を分析する上で必要であるため、上で述べたように需要を運賃のみで推定するといった改良が必要である。

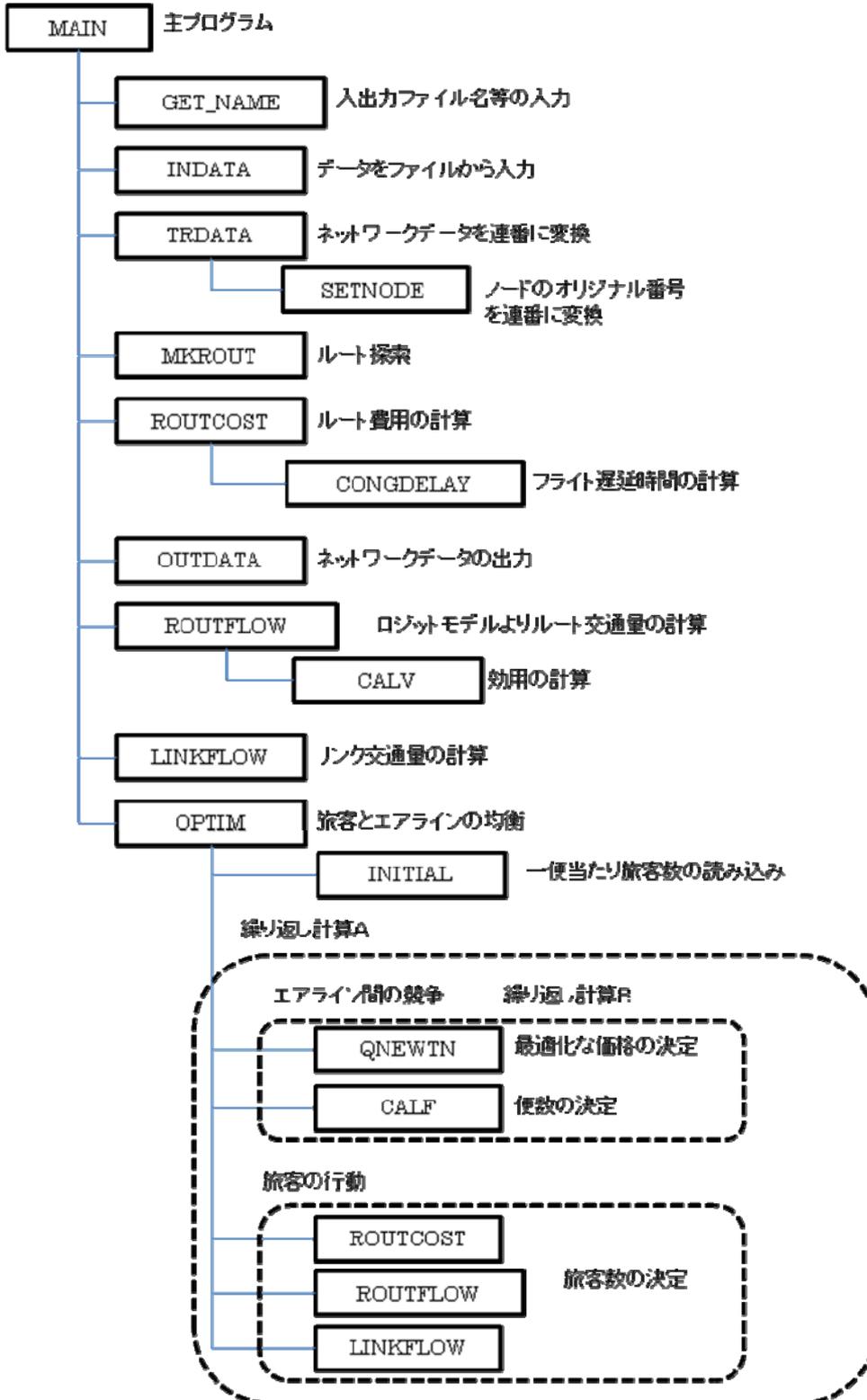
参考文献

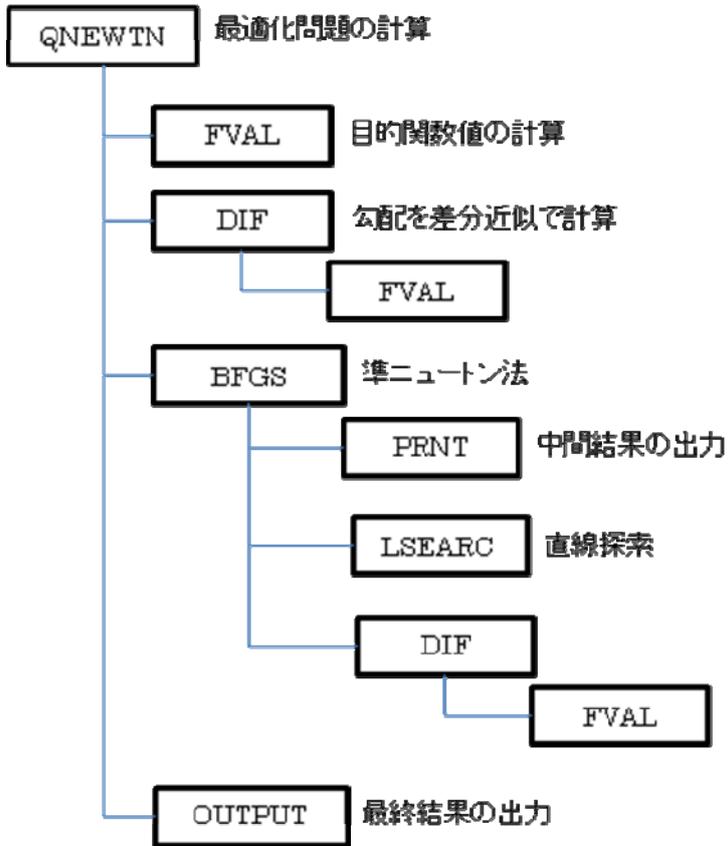
- 1) 国土交通省国土交通政策研究所: 東アジア航空市場とローコストキャリアの将来像, 国土交通政策研究, 第 74 号, 2006. 10.
- 2) 森地茂, 屋井鉄雄, 兵藤哲郎: 供給制約を考慮した, 航空需要モデル, 土木計画学研究・論文集, No. 6 1998. 11, 209-219, 1988.
- 3) 屋井鉄雄, 高田和幸: 国際航空における交通整備効果の分析, 土木計画学研究・講演集, No. 19 (2) 1996, 677-678, 1996.
- 4) 財団法人運輸政策研究機構: 航空需要予測手法に関する調査報告書, 2000. 3.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 航空需要予測について, 2005.
- 6) Airbus: Airbus Market Outlook for 2006-2025, <http://www.airbus.com/en/corporate/gmf/index.html>.
- 7) Brander, J A. and Zhang, A: Dynamic oligopoly behaviour in the airline industry, International Journal of Industrial Organization 11, 407-435, 1993.
- 8) 村上英樹, 国内航空運賃・費用の計量分析 : 政策変更の影響の測定, 研究年報. 経営学・会計学・商学, Vol 40, 67-92, 1994.
- 9) 花岡伸也: アジアの LCC のビジネスモデルの比較分析, 低費用航空会社(LCC)の研究, 航政研シリーズ, No.473, 51-71, 航空政策研究会, 2007.
- 10) 財団法人運輸政策研究機構: アメリカ航空産業の現状と今後の展望～過渡期にある国内市場とアジアでの展開～, 2007. 10.
- 11) Alderighi, M: The entry of low-cost airlines: price competition in the European airline market, Tinbergen Institute Discussion Paper, 2004-074/3, 2004.
- 12) Kanafani, A. and Ghobraial, A. A.: Airline hubbing - Some implications for airport economics, Transportation Research A, vol19A, No.1, 15-27, 1985.
- 13) Hansen, M.: Airline competition in a hub-dominated environment: an application of noncooperative game, Transportation Research B, vol24B, No.1 27-43, 1990.
- 14) 大橋忠宏, 安藤朝夫: ネットワークを考慮した航空旅客市場と航空政策のモデル分析, 応用地域学研究, No.2, 133-144, 1996.
- 15) 大橋忠宏, 安藤朝夫:航空市場でのハブ・スポークネットワーク形成と空港使用料政策に関する研究, 土木学会論文集, No.14, 757-764, 1997.
- 16) 大橋忠宏, 宅間文夫, 土屋和之, 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.
- 17) 竹林幹夫: 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・論文集, No. 22, 609-616, 2005.
- 18) 竹林幹夫, 黒田勝彦: 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, 土木計画学研究・論文集, No. 24, 427-435, 2007.
- 19) 石倉智樹: 寡占市場モデルと路線配便モデルの組合わせによる国内航空市場分析手法, 土木計画学研究・論文集, No. 24, 427-435, 2007.
 - 20) 高田和幸, 屋井鉄雄, 原田誠: 旅客とエアラインの地域特性を考慮した国際航空市場分析, 土木計画学研究・講演集, No. 22 (1), 207-210, 1999.
 - 21) 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.
 - 22) Donohue, G. L. and Laska, W. D.: United states and European airport capacity assessment using the GMU macroscopic capacity model, 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Napoli, 2000.

付録1 プログラムの構成

本モデルで使用したプログラムの構成表は以下の通りである。





付録2 最適化計算のアルゴリズム

本研究では準ニュートン法を用いて最適化を行う。準ニュートン法の解法を以下に示す。

今、次のような最小化問題を考える。

$$\min_x f(x) \quad (\text{A2-1})$$

準ニュートン法では、関数 f を以下の二次関数に近似した上で、その関数の最小値を求める。

$$q^{(k)}(d) = f(x^{(k)}) + \nabla f(x^{(k)})^T d + \frac{1}{2} d^T B^{(k)} d \quad (\text{A2-2})$$

$q^{(k)}(d)$: 繰り返し回数 k において、二次関数に近似された関数

$d = x - x^{(k)}$, ただし $x^{(k)}$ は繰り返し k における x の値

$B^{(k)}$: 適当な正定値対称行列

さらに、 $q^{(k)}(d)$ の最小点を $d^{(k)}$ とすると、最小化の条件より $\nabla q^{(k)}(d^{(k)}) = 0$ だから、

$$d^{(k)} = -(B^{(k)})^{-1} \nabla f(x^{(k)}) \quad (\text{A2-3})$$

ここで $B^{(k)}$ が正定値であることより

$$\nabla f(x^{(k)})^T d^{(k)} = -(d^{(k)})^T B^{(k)} d^{(k)} < 0 \quad (\text{A2-4})$$

(A2-1), (A2-2) より、 $d^{(k)}$ は $x^{(k)}$ における f の降下方向である。

そこで適当なステップ幅 $t^{(k)} (> 0)$ を選んで

$$x^{(k+1)} := x^{(k)} + t^{(k)} d^{(k)} \quad (\text{A2-5})$$

とすることにより

$$f(x^{(k+1)}) < f(x^{(k)}) \quad (\text{A2-6})$$

が成り立つようにできる。

ここで、次の準ニュートン条件が成り立つとする。

$$\nabla f(x^{(k+1)}) - \nabla f(x^{(k)}) = B^{(k+1)} (x^{(k+1)} - x^{(k)}) \quad (\text{A2-7})$$

(A2-7) を満たすように $B^{(k+1)}$ を定める方法は、BFGS 公式より

$$B^{(k+1)} = B^{(k)} + \frac{y^{(k)} (y^{(k)})^T}{(y^{(k)})^T s^{(k)}} - \frac{B^{(k)} s^{(k)} (s^{(k)})^T B^{(k)}}{(s^{(k)})^T B^{(k)} s^{(k)}} \quad (\text{A2-8})$$

ここで $y^{(k)} = \nabla f(x^{(k+1)}) - \nabla f(x^{(k)})$, $s^{(k)} = x^{(k+1)} - x^{(k)}$ である。