

# 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

大橋 忠宏<sup>1</sup>・安藤 朝夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(情報科学) 運輸政策研究所研究員 (財)運輸政策研究機構 (〒105-0001東京都港区虎ノ門3-18-19)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 東北大学大学院助教授 情報科学研究科 (〒980-8577仙台市青葉区片平2-1-1)

航空市場には空港管理者と航空会社、旅客が主体として関与している。既存研究では、航空会社毎の路線網を所与とした上で、旅客市場に限定して分析が行われることが多い。従って、ハブ・スポークネットワークの形成要因や空港使用料政策に関してはこれまで理論的には殆ど議論されてこなかった。本稿では航空市場参加主体の行動に基づいたモデルを構築し、ハブ・スポークネットワークが形成される条件、及び空港使用料政策が市場構造に与える影響について考察を行う。

**Key Words:** hub-spoke network, landing fee, scale economies from aircraft size, alternative mode

## 1.序論

航空市場には空港管理者と複数の航空会社・多数の旅客が主体として関与しており、各主体の行動結果として航空ネットワークが形成されると考えることは当然のことであろう。米国では1978年航空規制緩和法成立以降、ネットワークのハブ・スポーク化が進んだ<sup>1)</sup>。しかし、その形成要因については、必ずしも理論的に明らかにされていない。筆者の知る限り、ハブ・スポークネットワークの形成要因について、理論的な検討を行っている研究には、Hendricks et al.(1995)<sup>2)</sup>がある。彼らは、Brueckner and Spiller(1991)<sup>3)</sup>の呼ぶ輸送密度の経済性(付録1)特定化の一例として、路線数に比例した固定費用を考慮した利潤関数を用いて、ハブ・スポークネットワークが形成されるような固定費用の存在を示している。ただし、この固定費用の想定が曖昧であり、旅客の時間費用が考慮されていない等の問題もある。同様に工学的な研究で、例えばHansen(1990)<sup>4)</sup>が、ハブ・スポークネットワークを構築する航空会社とpoint-to-pointネットワークを構築する航空会社のそれぞれの行動をゲーム論的に記述することを試みているが、ハブ・スポークネットワークの形成要因は明らかにされていない。また、スケジューリング等に関する研究<sup>5)</sup>でもその形成要因は明らかにされていない。

<sup>1</sup> ネットワークを考慮した既存研究の多く<sup>6), 7), 8), 9)</sup>では、路線網をハブ・スポークネットワークに限定し分析が行われている。すなわち、これらでは、ハブ・スポークネットワークが形成されない状況の下で議論を行っている可能性がある。さらに、ネットワーク特性としての路線間の代替・補完関係や旅客の時間費用が十分考慮されていない等の問題もある。

他方近年、日本を含む多くの国々で空港運営、とりわけ空港発着枠制約の問題と空港整備のあり方についての見直しが進められている。日本における空港発着枠制約の問題は、国内航空に競争政策を導入できない根拠の一つとして指摘されている。空港運営に関して中条他(1995)<sup>10)</sup>では、日本の空港整備制度に対して、現行の空港整備特別会計では、空港間の内部補助が各空港の受益と負担の関係を曖昧にする故、効率の点でも負担の公平の点でも望ましくないと言うだけでなく、各空港の自由裁量を制限することによって、空港の発展をも阻んでいるとされている。特に、(I)全国一律の空港使用料<sup>2)</sup>、(II)本来各空港に帰属すべき燃料税収の問題点が指摘され、空港の独立採算制や空港使用料の弾力化・自由化等が提案されている。日本や欧州と比べ、比較的空港発着枠に余裕のある米国でもシカゴのオヘア空港等では空港発着枠制約の問題が深刻である。この現象が1社による空港独占及び混雑をもたらし、当該空港発着路線における独占運賃設定への懸念<sup>11)</sup>や弾力的空港使用料採用による混雑緩和への提案<sup>12)</sup>もある。

空港発着枠問題の解決策として、空港民営化の動きも観られる。例えば、英国では主要空港の完全民営化と地方空港の株式会社化が実施された。そしてロンドン地域の空港ではピークロードプライシングが適用されている<sup>13)</sup>。さらにオーストラリアやカナダでも空港民営化が進められている<sup>14)</sup>。

これに対し理論的分析は、航空旅客市場に関するもの

<sup>2</sup> 厳密に言えば、成田空港や関西国際空港のように一部の空港では個別に設定されている。

が殆どであり、空港使用料に関する分析は、筆者の知る限りOum et al.(1996)<sup>14)</sup>により行われているに過ぎない。そこではハブ・スポークネットワークに限定し、集権・分権的な場合について総余剰を最大化するような空港使用料をつけた場合、集権的な場合にはハブ空港とその末端空港間で内部補助が行われるという結果が示されている。しかし、旅客の時間費用が考慮されておらず、航空会社の費用も考慮されていない。

このような背景の下、航空市場構造や航空政策に関して分析を行うためには、まずハブ・スポークネットワークの形成要因を明らかにすることが本質的に重要である。さらに、航空市場構造を解明する上で、空港発着枠に関する資源配分の問題を無視することはできない。そこで、空港発着枠に関する資源配分問題として、空港使用料政策を扱う必要がある。従って、より全体的な問題として、ハブ・スポークネットワークの形成と空港使用料政策を同時に論じることが必要であると考えられる。

我々はこれまで路線間の代替・補完関係を考慮したモデルを構築し、社会的最適と市場均衡間の関係を考察し、数値解析を通じて航空政策の役割について考察を行った<sup>15)</sup>。そこでは、既存研究で指摘されている航空会社の費用特性としての輸送密度の経済性等は考慮されていない。従って、航空市場をモデル化する場合に既存研究で指摘されているこれらの特性を考慮することは必要である。

本研究ではまず、どのような状況下でハブ・スポークネットワーク形成されるのかを明らかにする。次に空港使用料に関する一考察として、全空港一律の空港使用料がつけられる場合と空港毎に異なる空港使用料がつけられる場合との間の社会的厚生の比較及び空港間の内部補助の可能性について明らかにする。以下複数機種を導入することで機材規模の経済性を考慮したモデルを構築し、数値分析を通じて前述の主題に接近する。直感的には、全空港一律使用料が設定されることは、空港別に異なる使用料が設定される場合と比較して、実行可能領域を限定するだけで社会的厚生の観点から望ましくないことは想像に難くない。しかし空港運営に関して、これまで理論的には殆ど議論されていない。従って、全空港一律使用料の問題について理論的に明らかにすることは、今後日本の空港運営問題に関する議論を行う上で重要な課題であると言えよう。

## 2. モデル

### (1) 航空市場についての仮定

本研究では、航空市場を図-1に示すように「空港発着枠市場と旅客市場を包含する市場」と定義する。前者は、空港管理者と複数の航空会社との間の空港発着枠に関する市場であり、後者は多数の旅客と航空・代替モード間

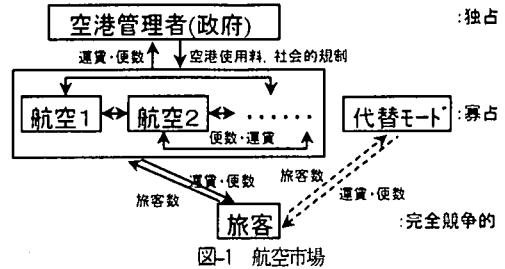


図-1 航空市場

表-1 記号の定義

発地番号	$i$	機材の種類の集合	$M$
着地番号	$j$	企業全体(代替モード含む)の集合	$A$
リンク番号	$l$	航空会社全体の集合	$A_A$
ルート番号	$r$	与えられたOD( $i, j$ )に対応するルートからなる集合	$R(i, j)$
ノード番号	$n$		
企業番号	$a$	与えられた $r$ を構成する、 $(l, a)$ の組の要素からなる集合	$L(r)$
$i$ または全体の集合	$I$	所与の下での $i$ の両端のノードを表す集合	$N(I)$
全体の集合	$L$		
全全体の集合	$R$	空港 $i$ を利用する $r$ を表す変換	$N^{-1}(i)$
$n$ 全全体の集合	$N$		

\*  $N^{-1}(n) = \{l | (n, n') \in N(l)\} \cup \{l | (n', n) \in N(l)\}$ : 逆変換の記号を用いているが数学的意味での逆変換ではない。

の座席に関する市場である。この航空市場に関して、次のような仮定を導入する。

(M1) ノードとは空港や駅のような交通結節点、リンクとは2つのノードを結ぶ路線のことである。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・企業の組み合わせを指す<sup>3)</sup>。ルート全体がネットワークを構成するものと考える。

(M2) 旅客のOD交通量は外生的に与えられ、ルート交通量はリンクでの運賃や便数の変化に対し弾力的である。

(M3) 航空会社はA社( $a=1, 2, \dots, A$ )存在し、すべてのリンクに代替モードが存在する。代替モードは、旅客市場の需給を整合させるために導入されるが、需要の変化に対して運賃・便数は変化せず、需要に見合うだけの交通サービスが供給される。こうした代替モードをまとめて $a=0$ で表記する。

(M4) 空港使用可能時間は空港により異ならず、長さ $T$ の特定の時間帯に制限されている。

(M5) 複数の企業が特定のリンクを運航するならば、その運航間隔は旅客のスケジュール調整コストに関し各企業毎に等間隔とし、個々のリンクでは企業毎にマーケットセグメンテーションがなされる<sup>4)</sup>。

(M6) 航空会社は保有機種・機材数を選択し、その機材を用いて路線での運航を行うが、ある特定の路線において

<sup>3</sup> 本稿で“企業”とは各航空会社及び代替モード運営主体を指す(図-2に模式図を示す)。

<sup>4</sup> 簡単のための仮定であるが、羽田一福岡間等のスケジュールは、航空会社毎にはば等間隔であり、一次近似としてはかなり現実と適合していると言えよう。この他にも最近の事前購入割引制度やFFP等が普及すれば、(M5)は容認されよう(大橋・安藤(1996))。

て航空会社が参入する際、一路線一機種とする。これは仮定(M5)に矛盾しないために導入する。

(M7)等間隔運航がなされている限り、スケジューリングについて矛盾は生じない。

以下、モデルの説明では、表-1に示す記号を用いる。

## (2)旅客

旅客の行動は大橋・安藤(1996)と同様にランダム効用最大化問題として考える(付録2)。その結果、旅客のルート選択確率 $P^r$ は、ロジットモデルで表現される<sup>10)</sup>。

$$P^r = \frac{\exp \omega(-p^r - \alpha x^r)}{\sum_{r \in R(i,j)} \exp \omega(-p^r - \alpha x^r)} \quad \text{for } r \in R(i,j) \quad (1)$$

ただし、 $p^r$ はルートの総運賃である。従って、ルート交通量 $x^r$ は、この $P^r$ を用いて以下のように書ける。

$$x^r = OD_{ij} P^r \quad \text{for } r \in R(i,j) \quad (1')$$

## (3)航空会社

個々の航空会社の行動も、基本的には大橋・安藤(1996)と同様に以下の仮定を設ける。ここでは、複数機種導入による変更点を中心に説明する。

(A1)航空会社は利潤の最大化を行う。

(A2)航空会社間の競争は、'ナッシュ的に行われる<sup>5)</sup>。

(A3)便数は連続変数として扱える<sup>6)</sup>。

(A4)運航便数は、上下同数とする。

(A5)仮定(M6)から、1便当たりの運航費用は各リンクで航空会社により異なる。

まず、航空会社の保有機材数 $K_a^m$ を用いて航空会社の機材制約は、以下のように修正される。

$$\sum_{l \in \Omega(a)} (t_a^l + TS) f_{am}^l \leq K_a^m T \quad \text{for } a \in A_0 \quad (2)$$

ここに、 $TS$ :1便当たりの機材整備時間、 $\Omega(a)$ はすべてのルート $r$ に含まれるリンク $l$ の内、航空会社 $a$ が運航するリンクの集合、すなわち $\Omega(a) = \{l | (l, a) \in L(r), \forall r\}$ 。

次に、モデルの表現上、旅客と航空会社の需給の関係式は、 $V_m$ :機材容量、 $x_a^l$ :企業 $a$ のリンク交通量とするとき以下のように表される。

$$x_a^l = \sum_{r \in R(l, a) \in L(r)} \sum_{m \in M} x^r \leq \sum_{m \in M} f_{am}^l V_m \quad (3)$$

(A6)1便当たりの運航費用 $OC_{am}^l$ は機種 $m$ により異なるとし、以下の関係を機材規模の経済性とよぶこととする。

<sup>5)</sup> (1),(1')に航空会社間の競争関係が反映される。“ナッシュ的に”とは、当該航空会社が利潤最大化を行う際、自己の運賃・便数の変化に対して、他の航空会社・代替モード等の運賃・便数が変化しないと推測することを意味する。

<sup>6)</sup> (A3)により、条件式の限界的な解釈が可能となる。例えば、週1便を1日当たりに換算すると0.14便/日であり、実際は離散変数であるが連続変数のように扱える。同様に、1年間当たりの便数は十分大きな値であり、(A3)は容認されよう。

$$OC_{am}^l > OC_{an}^l \text{ and } \frac{OC_{am}^l}{V_m} < \frac{OC_{an}^l}{V_m} \text{ if } V_m > V_n$$

(A7)着陸と離陸に要する使用料は同じであるとする。

$H_{nm}$ を1便当たりの離・着陸料、 $H_m^l$ を路線1便当たりに換算した空港使用料とすると、その関係は以下のよう示される。

$$H_m^l = \sum_{n \in N(l)} H_{nm} \quad (4)$$

一路線一機種の仮定から以下の関係が成立する。

$$\prod_{m \in M} f_{am}^l = 0 \quad (5)$$

以上の仮定の下、航空会社( $a \in A_a$ )の利潤関数を

$$\pi_a = \sum_{l \in \Omega(a)} (p_a^l x_a^l - (H_m^l + OC_{am}^l) f_{am}^l - SC_a^l x_a^l) - \sum_{m \in M} k_m K_a^m - FC_a \quad (6)$$

とするととき、航空会社は以下の問題に直面する<sup>7)</sup>。

$$\max_{p_a^l, f_{am}^l, K_a^m \geq 0} \pi_a \quad \text{s.t. (2),(3),(5)} \quad (7)$$

ここに、 $p_a^l$ :運賃、 $FC_a$ :固定費用、 $SC_a^l$ :旅客1人当たりのサービス費用、 $k_m$ :1機材当たりに要する費用とする。(7)のラグランジュ関数を $\Phi_a$ とし、(2),(3),(5)のラグランジュ乗数をそれぞれ $\lambda_a^m, \mu_a^l, \delta_a^l$ とする。Kuhn-Tucker条件から、運賃・便数・保有機材数が共に正のとき、1階の条件は、

$$\frac{\partial \Phi_a}{\partial p_a^l} = x_a^l + \sum_{l' \in \Omega(a)} (p_a^{l'} - SC_a^{l'} - \mu_a^{l'}) M 1^{l'a} = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_a}{\partial f_{am}^l} = & \frac{\alpha T}{4(\sum_{m' \in M} f_{am'}^l)^2} x_a^l - (H_m^l + OC_{am}^l) \\ & - \lambda_a^m (t_a^l + TS) + \mu_a^l V - \delta_a^l \prod_{m' \in M} f_{am'}^l = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Phi_a}{\partial K_a^m} = -k_m + T \lambda_a^m = 0 \quad (10)$$

と書くことができる(付録3参照)。 $\lambda_a^m$ は機材を使用するための単位時間当たり限界費用、 $\mu_a^l$ は1座席当たりの旅客にとっての限界価値或いは航空会社が1座席多く供給するための限界費用と解釈される。

式(8)或いは式(9)は、限界的な運賃或いは便数の変化に対する航空会社の限界収入と限界費用が等しくなることを意味する。式(10)は1機材当たりの購入(或いはリース)費用は、機材の機会費用に等しいことを意味する。

## (4)空港管理者

空港運営利潤、空港容量制約、社会的厚生関数を以下のように定義する。

<sup>7)</sup> 本稿で、代替モードは旅客数に応じた費用を負担する。代替モードの利潤関数は、式(6)に倣って次のように設定される。

$$\pi_0 = \sum_{l \in \Omega(0)} (p_0^l x_0^l - OC_{0m}^l) f_{0m}^l - SC_{0a}^l x_0^l - FC_0$$

$$G_n = \sum_{m \in M} (H_{nm} - GC_{nm}) \quad \sum_{(l,a) \in \{(l,a) | l \in N^{-1}(n), a \in A_{-0}\}} f_{am}^l \\ - A_n CAPA_n \quad \text{for } n \in N \quad (11)$$

$$\sum_{(l,a) \in \{(l,a) | l \in N^{-1}(n), a \in A_{-0}\}} \sum_{m \in M} f_{am}^l \leq CAPA_n \quad \text{for } n \in N \quad (12)$$

$$W = \sum_{i,j \in I} OD_{ij} \frac{1}{\omega} \sum_{r \in R(i,j)} \exp(\omega(U_{ij} - B^r) + \sum_{a \in A} \pi_a + \sum_{n \in N} G_n \quad (13)$$

ここに,  $GC_{nm}$ : 1便当たりに要する空港費用（例えば管制に要する費用）,  $A_n$ : 空港容量維持単位費用或いは空港建設に伴う利子支払い,  $CAPA_n$ : 空港 $n$ の離発着容量とする。社会的厚生関数は、3種類の主体の便益の和として式(13)のように定義される（付録4参照）。式(13)右辺第1項は、旅客の消費者余剰、第2項は航空及び代替モードの利潤の和、第3項は空港運営利潤の和を表す。

空港管理者には、ここでは政府を想定する。大橋・安藤(1996)では、空港管理者の行動に関して空港を所有する政府に委任された各空港毎の管理者が必要最小限空港を維持し得るような空港使用料を徴収すると仮定していた。しかし、空港所有者を政府と想定する以上、政府がそのような消極的な行動を探るよりは、むしろ積極的に社会的厚生を最大化するような空港使用料設定を行うと考えるのが自然であろう。従って、ここでは政府は、システム全体で空港運営利潤非負制約・空港容量制約の下で社会的厚生が最大となるように空港使用料を決定するものとする（付録5）。すなわち、政府の直面する問題は、

$$\max_{H_{nm} \geq 0} W(H_{nm}, \eta_a(H_{nm})) \text{ s.t. (12), } \sum_{n \in N} G_n \geq 0 \quad (14)$$

のように表すことが出来る。ここで、

$$\eta_a(H_{nm}) = \{(p_a^l, f_{am}^l, K_a^m | p_a^l, f_{am}^l, K_a^m, H_{nm}) \\ | \max_{p_a^l, f_{am}^l, K_a^m \geq 0} \pi_a, \text{s.t. (2), (3), (5)}\}$$

とする。ラグランジュ関数を $\Psi$ 、空港運営利潤非負制約、(12)のラグランジュ定数をそれぞれ $\theta$ 、 $\tau_n$ とすると、Kuhn-Tucker条件より $H_{nm} > 0$ のとき、一階の条件は以下のように書ける。

$$\frac{\partial \Psi}{\partial H_{nm}} = \sum_{a \in A_{-0}} \left[ \sum_{l \in \Omega(a)} \left( \frac{\partial W}{\partial p_a^l} \frac{\partial p_a^l}{\partial H_{nm}} + \frac{\partial W}{\partial f_{am}^l} \frac{\partial f_{am}^l}{\partial H_{nm}} \right) \right. \\ \left. + \frac{\partial W}{\partial K_a^m} \frac{\partial K_a^m}{\partial H_{nm}} \right] - \sum_{n' \in N} \tau_{n'} \sum_{\substack{(l,a) \in \{(l,a) | \\ l \in N^{-1}(n'), a \in A_{-0}\}}} \frac{\partial g_{n'}}{\partial f_{am}^l} \frac{\partial f_{am}^l}{\partial H_{nm}} \\ + \theta \left[ \frac{\partial G_n}{\partial H_{nm}} + \sum_{n' \in N} \sum_{\substack{(l,a) \in \{(l,a) | \\ l \in N^{-1}(n'), a \in A_{-0}\}}} \frac{\partial G_{n'}}{\partial f_{am}^l} \frac{\partial f_{am}^l}{\partial H_{nm}} \right] = 0 \quad (15)$$

ただし、 $g_n = CAPA_n - \sum_{(l,a) \in \{(l,a) | l \in N^{-1}(n), a \in A_{-0}\}} f_a^l$  とおく。

ここで $\tau_n$ は追加的に必要な1便当たりの社会的な空港使用料、 $\theta$ は空港運営利潤の社会的重みと解釈される。式(15)は限界的空港使用料の変化に対する航空運賃・便数・保

有機材数への変化を通じた市場参加主体の限界便益の和に空港運営利潤の社会評価額を加えたものが空港発着枠の社会的評価額に等しくなることを意味する。

### (5) 市場の未知変数と均衡条件

市場全体での均衡条件式を整理し列挙すると、

#### a) 旅客

旅客の行動から条件式として、OD交通量 $OD_{ij}$ とルート交通量に関する式。

$$OD_{ij} = \sum_{r \in R(i,j)} x^r \quad \text{for } i, j \in I$$

及び式(1), (1')が得られる。しかし式(1), (1')が満たされるならば、OD交通量とルート交通量の関係式は必然的に満たされ、条件式としては冗長となる。したがって、旅客の行動から得られる条件式は式(1), (1')となる。

#### b) 航空会社

個々の航空会社の利潤最大化行動から得られるKuhn-Tucker条件として、以下の条件式が得られる。

航空運賃：

$$p_a^l \cdot \frac{\partial \Phi_a}{\partial p_a^l} = 0, \frac{\partial \Phi_a}{\partial p_a^l} \leq 0, p_a^l \geq 0 \quad \text{for } a \in A_{-0}, l \in \Omega(a) \quad (8')$$

航空便数：

$$f_{am}^l \cdot \frac{\partial \Phi_a}{\partial f_{am}^l} = 0, \frac{\partial \Phi_a}{\partial f_{am}^l} \leq 0, f_{am}^l \geq 0 \quad \text{for } a \in A_{-0}, l \in \Omega(a), m \in M \quad (9')$$

保有機材数：

$$K_a^m \cdot \frac{\partial \Phi_a}{\partial K_a^m} = 0, \frac{\partial \Phi_a}{\partial K_a^m} \leq 0, K_a^m \geq 0 \quad \text{for } a \in A_{-0}, m \in M \quad (10')$$

機材制約：

$$\lambda_a^m \cdot \frac{\partial \Phi_a}{\partial \lambda_a^m} = 0, \frac{\partial \Phi_a}{\partial \lambda_a^m} \geq 0, \lambda_a^m \geq 0 \quad \text{for } a \in A_{-0}, m \in M \quad (2')$$

需給制約：

$$\mu_a^l \cdot \frac{\partial \Phi_a}{\partial \mu_a^l} = 0, \frac{\partial \Phi_a}{\partial \mu_a^l} \geq 0, \mu_a^l \geq 0 \quad \text{for } a \in A_{-0}, l \in \Omega(a) \quad (3')$$

一路線一機種制約：

$$\delta_a^l \cdot \frac{\partial \Phi_a}{\partial \delta_a^l} = 0, \frac{\partial \Phi_a}{\partial \delta_a^l} \geq 0, \delta_a^l \geq 0 \quad \text{for } a \in A_{-0}, l \in \Omega(a) \quad (5')$$

#### c) 空港管理者

空港管理者の直面する問題のKuhn-Tucker条件として以下の条件式が得られる。

空港使用料：

$$H_{nm} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial H_{nm}} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial H_{nm}} \leq 0, H_{nm} \geq 0 \quad \text{for } m \in M, n \in N \quad (15')$$

空港容量制約：

$$\tau_n \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \tau_n} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial \tau_n} \geq 0, \tau_n \geq 0 \quad \text{for } n \in N \quad (12')$$

空港運営利潤非負制約：

$$\theta \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \geq 0, \theta \geq 0 \quad (16)$$

(a)-(c)から、ルートの数を $r$ 、航空会社数を $A$ 、リンク数を $l$ 、機種数を $m$ とすると、式(1),(1')が各 $r$ 本、式(8'),(3'),(5')が各 $A \times l$ 本、式(10'),(2')が各 $A \times m$ 本、

式(9')が $A \times m \times l$ 本、式(15')が $n \times m$ 本、式(12')が $n$ 本、式(16)が1本であり、合わせて、 $2r+3(A \times l)+(A \times m \times l)+2(A \times m)+(n \times m)+n+1$ 本の式が得られる。

#### (d) 未知変数

未知変数は  $P^r, x^r, p_a^l, f_{am}^l, K_a^m, H_{nm}, \lambda_a^m, \mu_a^l, \delta_a^l, \tau_n, \theta$  の計  $2r+3(A \times l)+2(A \times m \times l)+(A \times m)+(n \times m)+n+1$  個であり、条件式と未知変数の個数は一致する。

### 3. 数値計算と結果の考察

#### (1) 数値分析の目的と設定

本研究の目的は、航空市場の特性、特に近年話題となっているハブ・スポークネットワークがどのような状況下で形成されるのか示すこと、及び空港使用料政策の評価にある。前述のモデルにおいて、均衡諸变量は、解析的に陽関数として導出されない。従って以下、数値解析を行うことにより、均衡諸变量を計算し、市場で達成されたネットワークの形状を観察する（付録6参照）。

数値分析では、図-2に示すようにノード数、可能なリンクの組み合わせ等を外生的に与えている。まずノード数は3で、それぞれの地理的位置として①大阪、②仙台、③福岡を想定している。このとき運航可能な路線数（すなわちリンク数）は3であり、旅客の選択可能なルートには航空・代替モードの乗り継ぎルートも含まれる。また、基本ケースにおける航空会社数は1社、すなわち独占とした。基本ケースのデータを表-2に示す。ラインホール時間（時間）及び代替モードの運賃（万円）は、現実に沿った値を設定しているが、その他のOD交通量等のデータは仮設値である。ここで、 $CAP_{ai}$ は、3(3)で用いるデータであり、3(2)では $\alpha$ として計算している。航空会社の固定費用は、参入障壁として存在するが、ここでは0とし、 $A_n$ も0としている。

数値計算では、次の2つの追加的仮定を設ける。

仮定1: 路線1は航空・代替モード共に乗り継ぎの対象路線とはならない。すなわち乗り継ぎも含めたルート選択をするのは  $OD_{21}$  の旅客のみとする。

仮定2: もしも  $t_a^l = t_{a'}^l, OC_{am}^l = OC_{a'm}^l, SC_{am}^l = SC_{a'm}^l$  ならば、 $p_a^l = p_{a'}^l$  and  $f_{am}^l = f_{a'm}^l$  とする。

(for  $a, a' \in A_{-0}, l \in \Omega(a) \cap \Omega(a')$ ).

仮定1は空港1のみがハブ空港になる可能性があることを示す便宜上の仮定である。次に仮定2はある特定路線に複数の航空会社が運航する場合、航空会社間でラインホール時間及び1便当たり運航費用、旅客1人当たりサービス費用が同じであるなら運賃と便数は航空会社間で異ならないことを意味する。これは、当該路線が寡占の場合、我々の仮定の下では、共通に参入している路線において

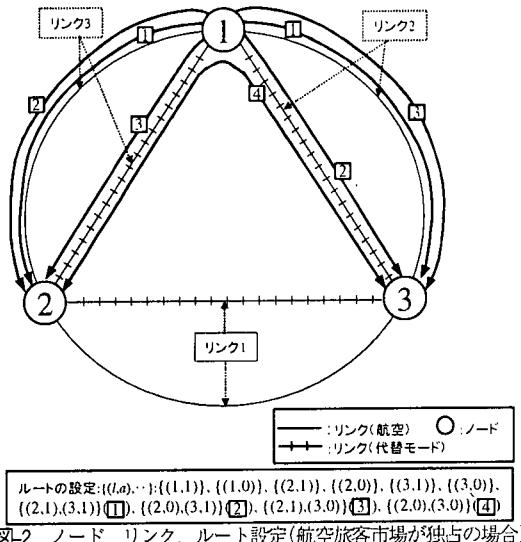


図-2 ノード、リンク、ルート設定(航空旅客市場が独占の場合)

表-2 基本ケースのデータ

ゾーン/ノードデータ			その他のデータ	
	1	2	3	
				$m=1$ $m=2$
$OD_{ai}$	1 0 8000 12000	2 8000 0 1000	3 12000 1000 0	$V_m$ 300 150
$CAP_{ai}$	50 50 50	40 40 40	35 35 35	$k_m$ 700 450
$GC_{nl}$				$TS$ 0.67
$GC_{n2}$				$\alpha$ 0.2
				$T$ 15

リンクデータ

	1	2	3
$t_a^l$	2	1	1.2
$t_0^l$	7	2.7	4.3
$p_0^l$	3.6	1.5	2.4
$f_0^l$	2	20	10
$OC_{a1}^l$	80	50	60
$OC_{a2}^l$	70	40	50
$OC_0^l$	80	50	70
$SC_a^l$	0	0	0
$SC_0^l$	0.1	0.1	0.1

競争の結果、運賃・便数に差が出る誘因が存在しないためである。ただし、2社以上が複数の路線に参入が認められるなら、航空会社間で路線の棲み分けが生じる可能性がある。しかし、これは本研究の分析範囲とはせず、仮定2により排除する。

数値計算を行う上で、どのような状況をハブ・スパークネットワークと呼ぶのかが問題となる。以下では、ハブ・スパークネットワークを次のような場合に呼ぶこととする。

定義：航空会社がある特定の1路線で運航しない状況をハブ・スパークネットワークと呼ぶ。

この定義に、前述の仮定を加味すると、本稿では、航

空会社が路線 1 で運航しない状況のことをハブ・スポートネットワークと呼ぶ<sup>8</sup>。

以下数値計算の前半では、ハブ・スポートネットワークがどのような状況の下で形成されるのかを中心に考察する<sup>9</sup>。この結果は表-3 に示される。さらに後半では、空港使用料政策について分析を行っているが、この数値計算の結果は表-4, 5 に示される。ここで、航空便数は 1 社当たりの値を表示している。

## (2) ネットワーク形成に関する考察

ここでは、様々な外生変数の下で達成されるネットワーク形状を通じて、ハブ・スポートネットワークの形成要因について明らかにする。その際、空港使用料は外生的に与えられるものとする。まず、基本ケースとの比較からケース 1-4 を観ることで、パラメータの変化が市場構造に与える影響について考察する。尚、表-3 のケース名右の括弧内は基本ケースから変化させた外生変数の値を示している。

まずケース 1 から、旅客の時間価値パラメータ  $\alpha$  の上昇は全ての路線で航空運賃・便数を増加させる。さらに旅客数から  $\alpha$  の上昇は航空のシェアを増加させる。

ケース 2 は、 $\alpha$  の上昇と代替モード便数が減少した場合である。このとき、各路線の航空のシェアは増加し、乗り継ぎ旅客も増加している。しかし、独占の場合、この他にも代替モードの便数を変化させて計算を行ったが、代替モードの変化だけではハブ・スポートネットワークは形成されない。

ケース 3 は機材規模の経済性が弱まった場合の計算結果である。このとき航空会社により路線 1 で使用機種変更が行われるだけである。

ケース 4 はノード 2-3 間の OD 交通量が減少した場合の結果である。この場合、ハブ・スポートネットワークが形成されている。これは、旅客が直行便を利用するよりも乗り継ぎ便を利用する方が一般化費用が十分に低くなるためである。

ケース 5-7 はケース 2 に更に参入が生じる場合である。この参入の効果については、社会的厚生も含めてケース 2 と比較する。このとき、幹線の一部或いは全路線が複数になることでハブ・スポートネットワークが形成される。

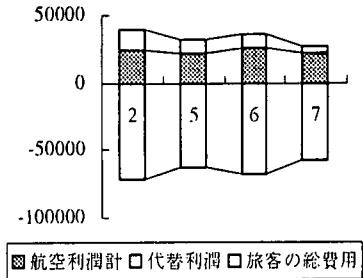


図-3 ケース 2.5-7 の社会的厚生の構成

この理由は、運賃の減少と便数の増加により、OD<sub>23</sub> の旅客が直行便ルートよりも乗り継ぎルートを選択する方が一般化費用が十分低くなるためである（図-3）。

ここでケース 5 に比べケース 6 では、社会的厚生は減少している。このことから幹線の内、代替モードが相対的に整備されていない路線へ参入が行われる方がそうではない場合と比較して、社会的厚生の観点から望ましいと言える。これは代替モードが相対的に整備されていない路線の方が、旅客の時間費用減少に及ぼす効果が大きくなるためである。

紙面の都合上割愛するが、 $\alpha$  が小さく、代替モードが十分整備されている状況の下では、新規参入が行われてもハブ・スポートネットワークが形成されない場合もある。さらに航空会社の参入により社会的厚生は悪化する。

以上の結果から結論として次のことが言える。  
「機材規模の経済性の有無に関わらず、乗り継ぎルートでの旅客の一般化費用が直行便ルートを利用する場合の一般化費用に比べて十分低い状況の下で、ハブ・スポートネットワークが形成される。」

乗り継ぎルートの方が直行便ルートよりも旅客の一般化費用が十分低くなる状況は、①幹線への新規参入、②対象となる市場の中で、他の OD 交通量に比べて相対的にかなり需要の少ない OD が存在する場合、に現れる。この傾向は、旅客の時間価値の上昇や代替モードがあまり整備されていない場合に顕著である。尚、幹線への新規参入の効果に関して、代替モードがあまり整備されていない路線へ新規参入が行われる方が、そうでない場合と比較して旅客の一般化費用の減少の程度が大きいため、高い社会的厚生を達成することが出来る。

ところで、今回の計算結果からは、機材規模の経済性とハブ・スポートネットワーク形成との関係は確認することが出来なかった。ただし、ケース 3 のように機材規模の経済性が弱まる場合には、ローカル線でのみ機種変更が行われ、幹線での使用機種変更是認められなかった。このことは Caves et al.(1984)の分析で、ローカル線程、密度の経済性が働くとされていたことと一致していると言えよう。

<sup>8</sup> ハブ・スポートネットワーク構築は、航空会社の戦略という認識が一般的である。乗り継ぎ旅客が存在しない場合、すなわち、ここでは OD<sub>23</sub> の旅客すべてが路線 1 の代替モードを利用する場合にも、サービス供給側からはハブ・スポートネットワークが形成されていると言えよう。ただし、このような場合、需要側からはハブ・スポートネットワークが形成されているとは言い難い。

<sup>9</sup> 仮定 1.2 を設けない場合、すなわち、3 路線が対等であり、航空会社間での路線のすみわけが生じないならば、物理的にハブ・スポートネットワークの形成される可能性は高くなる。



### (3)空港使用料政策に関する考察

ここでは、全国一律の空港使用料が設定される場合と空港毎に異なる空港使用料が設定される場合とを比較し、空港使用料政策について考察を行う。ただし、表-5 のケース名は、表-4 の各ケースと同じパラメータを用いたという意味で、それに対応するように<sup>10</sup>をついている。

まずケース 1 と比較してケース 1' では、路線 1 を排除するような空港使用料が設定され、さらに空港 2 が内部補助を受ける。そのとき、航空会社利潤・旅客の総費用は悪化するが、代替モード利潤・空港運営利潤が増加するため、社会的厚生は改善される。

ケース 2・2' は路線 3 が複占になる場合の計算結果である。ケース 2 と 2' を比較して、路線網の形状自体は変化しない。しかし、各空港毎に使用料が設定されるときには、全空港一律の使用料が設定されるよりも路線 2 の航空便数が減少し、路線 3 の航空便数が増加している。その結果、全空港一律の使用料が設定される場合に比べ社会的厚生は改善される。ただし、その改善分の殆どは空港運営利潤であり、旅客の総費用等は増加している。

ケース 3・3' は路線 2 が複占になった場合である。ケース 3 と比較してケース 3' では、空港毎に異なる空港使用料が設定され、路線 2 の便数が減少し、路線 3 の便数が増加する。その結果、空港運営利潤・航空会社利潤は減少するが、代替モード利潤の増加・旅客総費用の減少により社会的厚生は増加する。

ケース 4・4' は、全路線が複占になった場合の計算結果である。このときケース 4 と比較して、ケース 4' では空港 1 での使用料が高く設定される。さらに、各空港毎に異なる空港使用料が設定されることで、代替モードがあまり整備されていない路線 2 への割り当てを優先させるような使用料の設定が行われ、ケース 4 よりも高い社会的厚生が達成される。

紙面の都合上割愛するが、 $\alpha$  が極端に低く、代替モードが十分整備されている状況の下では、航空モードは排除される。これは、航空モードの導入による旅客の総時間費用減少より、運航費用や空港での費用増分の方が大きいためである。

以上から得られた結論を、空港毎に異なる空港使用料が設定される場合の結果を全空港一律の空港使用料が設定される場合の結果に対比させることで以下に示す。

- 1.全空港一律の空港使用料の設定と対比して、空港別に異なる空港使用料が設定される場合には、社会的厚生は改善される。
- 2.政府は、OD 交通量が他と比べて極めて少ないゾーン間での航空の直行便運航を排除する。
- 3.OD 交通量が多いゾーン間を結ぶ直行便運航について、代替モードが相対的に整備されていない路線で航空モードの頻度を増加させるように（内部補助の可能性も含め

て）空港使用料を変化させることにより、航空会社を誘導し、より高い社会的厚生を達成する。

- 4.空港容量制約が有効である場合、代替モードがあまり整備されていない路線への割り当てを優先させるような空港使用料を設定することにより、高い社会的厚生を達成できる。
- 5.旅客の時間価値パラメータ  $\alpha$  が低い場合や、代替モードが十分整備されている場合には、政府は航空モードを排除する。

### 4.結論

本研究では、航空市場を政府・航空会社・旅客の行動として記述し、市場均衡解を数値分析により導出し、前半ではハブ・スポークネットワークの形成、後半では空港使用料政策について考察を行った<sup>10</sup>。

まずハブ・スポークネットワーク形成に関する結論としては、旅客の一般化費用が直行便に比べて乗り継ぎルートの方が（十分）低い場合にハブ・スポークネットワークが形成されることが明らかにされた。これは、既存研究で指摘されている航空会社の費用特性とは無関係に成立する。乗り継ぎルートの一般化費用が直行便のそれと比較して低くなるのは、乗り継ぎルートを構成する路線に対して企業参入が行われる場合と OD 交通量が相対的に少ない OD が存在する場合である。

ただし航空経済学者の中には、「限られた機材でネットワークを拡大するため、航空会社はハブ・スポークネットワークを形成する。」との指摘もある。これはより多くの都市を結ぶことで、航空会社は誘発需要や転換需要を喚起することができ、その結果利潤を上昇させることを意味すると言えよう。この効果を考慮するためには、①OD 交通量の内生化及び②路線数や便数の多寡による旅客の多様性選好の導入、③ルート毎に航空運賃が決定されるようなモデルへの拡張が必要である。従って、本研究ではハブ・スポークネットワークの形成要因としてはその一部が明らかにされたに過ぎない。しかし、航空ネットワーク形成に関して、既存研究では航空会社側の要因のみが注目されていたという点において、旅客側の要因からもハブ・スポークネットワーク形成の可能性を示せたことは、重要な示唆となりうるであろう。

次に空港使用料政策に関する分析の結論として、全空

<sup>10</sup> ハブ・スポークネットワークは、米国の規制緩和以降に観察された路線網の形態の一つである。現実には、後背地域に大規模な需要がある場合だけでなく、空港運営主体の誘致により、ハブ空港ができる場合もある。本稿ではハブ・スポークネットワーク形成には需要側の要因のみが関係していることが明らかにされたが、今後は上述のような空港運営側等の要因も考慮した上で議論する必要があろう。

表-4 空港使用料政策の評価（全空港一律の使用料の場合）

ケース 1( $\alpha = 0.4, f_0^1 = 2, f_0^2 = 20, f_0^3 = 10$ )

路線	航空 運賃	航空便数		旅客数		空港	空港使用料		機材保有数	空港運営利潤
		m=1	m=2	航空計	代替		m=1	m=2		
1	3.75	1.50	0.00	425	86	1	40	35	4.44	0.00
2	2.42	18.26	0.00	5479	7010	2	40	35		
3	3.27	17.17	0.00	5151	3339	3	40	35		

ケース 2(路線 3 のみ複占,  $\alpha = 0.4, f_0^1 = 2, f_0^2 = 20, f_0^3 = 10$ )

路線	航空 運賃	航空便数		旅客数		空港	空港使用料		機材保有数	空港運営利潤
		m=1	m=2	航空計	代替		m=1	m=2		
1	-	-	-	0	42	1	40	35	4.13	0.00
2	2.28	20.54	0.00	6162	6571	2	40	35		
3	2.24	14.82	0.00	8424	941	3	40	35		

ケース 3(路線 2 のみ複占,  $\alpha = 0.4, f_0^1 = 2, f_0^2 = 20, f_0^3 = 10$ )

路線	航空 運賃	航空便数		旅客数		空港	空港使用料		機材保有数	空港運営利潤
		m=1	m=2	航空計	代替		m=1	m=2		
1	-	-	-	0	85	1	69	38	4.06	0.00
2	2.07	15.51	0.00	9268	4043	2	69	38		
3	3.18	18.75	0.00	5620	3179	3	69	38		

ケース 4(全路線複占,  $\alpha = 0.4, f_0^1 = 2, f_0^2 = 20, f_0^3 = 10$ )

路線	航空 運賃	航空便数		旅客数		空港	空港使用料		機材保有数	空港運営利潤
		m=1	m=2	航空計	代替		m=1	m=2		
1	-	-	-	0	64	1	192	139	2.95	0
2	2.61	12.45	0.00	7384	5594	2	192	139		
3	2.92	12.52	0.00	7438	1659	3	192	139		

表-5 空港使用料政策の評価（空港別使用料の場合）

ケース 1'( $\alpha = 0.4, f_0^1 = 2, f_0^2 = 20, f_0^3 = 10$ )

路線	航空 運賃	航空便数		旅客数		空港	空港使用料		機材保有数	空港運営利潤
		m=1	m=2	航空計	代替		m=1	m=2		
1	-	-	-	0	146	1	53	35	4.35	0
2	2.47	18.28	0.00	5484	7371	2	0	0		
3	3.19	18.54	0.00	5560	3294	3	73	53		

ケース 2'(路線 3 が複占,  $\alpha = 0.4, f_0^1 = 2, f_0^2 = 20, f_0^3 = 10$ )

路線	航空 運賃	航空便数		旅客数		空港	空港使用料		機材保有数	空港運営利潤
		m=1	m=2	航空計	代替		m=1	m=2		
1	-	-	-	0	45	1	56	16	3.96	0
2	2.37	19.60	0.00	5869	6853	2	38	27		
3	2.25	14.28	0.00	8386	956	3	72	45		

ケース 3'(路線 2 が複占,  $\alpha = 0.4, f_0^1 = 2, f_0^2 = 20, f_0^3 = 10$ )

路線	航空 運賃	航空便数		旅客数		空港	空港使用料		機材保有数	空港運営利潤
		m=1	m=2	航空計	代替		m=1	m=2		
1	-	-	-	0	81	1	34	38	4.14	0
2	2.12	15.22	0.00	9132	4197	2	0	0		
3	3.05	19.65	0.00	5873	2920	3	128	68		

ケース 4'(全路線複占,  $\alpha = 0.4, f_0^1 = 2, f_0^2 = 20, f_0^3 = 10$ )

路線	航空 運賃	航空便数		旅客数		空港	空港使用料		機材保有数	空港運営利潤
		m=1	m=2	航空計	代替		m=1	m=2		
1	-	-	-	0	59	1	243	195	2.93	0
2	2.65	12.10	0.00	7260	5716	2	95	70		
3	2.80	12.69	0.00	7612	1497	3	158	95		

港一律の空港使用料が設定される場合と比べて、空港毎に異なる空港使用料が設定される場合には、①社会的厚生を改善すること、②政府は社会的厚生の観点から需要の小規模なローカル線運航を排除するような空港使用料を採用すること、③代替モードがあまり整備されていない幹線を抱える空港では空港使用料が低く設定され、結果として内部補助を受ける場合があること等が確認された。ただし②は、離島路線を排除することは意味しない。何故なら、本稿ではローカル線が排除されても、代替モードや乗り継ぎルートを利用することにより、目的地へ到達できるからである。③は、空港使用料低下による運賃低下・便数増加を促すことで旅客の一般化費用を低下させる効果が、代替モードがあまり整備されていない路線を有す空港で大きかった為である。

ただし、空港使用料政策について論じるためには、空港混雑の考慮が本質的に重要である。その意味において、以上の分析には問題がある。しかし空港混雑が無くとも、全国一律の空港使用料設定が社会的厚生の観点から好ましくないことを示せたことは、現行の日本における空港使用料政策に関して問題があることを明らかにさせたと言えよう。この意味において本稿の結論は、日本の空港政策に関して一つの問題提起が出来たと考えられる。勿論、日本の空港政策の問題点は、最初に述べたように空港整備特別会計や燃料税の分配等の制度にある。この点に関して議論するためには、政府が空港整備を行うような枠組みへの拡張が必要である。

さらに本稿の枠組みでは、政府が全空港を所有すると仮定した。これを日本に当てはめると、空港は第1-3種に分類され、運営主体も政府単独、政府と地方自治体、地方自治体のみの場合があり、必ずしも国が全空港を所有しているわけではない。しかし、空港整備特別会計の存在や同一空港使用料の採用と言う観点から言えば、近似的にはこのような仮定も容認されよう。このように、本研究には多くの課題が存在するものの、空港発着枠市場と旅客市場とを航空市場として扱い、数値分析を通じて航空市場構造等に関する分析可能性について示せたことは、航空市場分析の発展に貢献できたと思われる。

今後の課題としては、OD交通量内生化や空港混雑の導入及び大規模ネットワークでの分析が必要であろう。これらのこと考慮することで、より一般性を有した分析が可能となるであろう。

謝辞: ARSC1997年発表大会の討論者である山内弘隆氏(一橋大学)、匿名の査読者、佐々木公明、文世一、森杉壽芳、稻村肇の各氏(東北大学)には、多くの有益なコメントを頂いた。記して感謝の意を表します。本稿の有り得べき誤りは筆者に帰属します。

## 付録1

航空会社の費用特性として、輸送密度の経済性や機材規模の経済性が働いていることが実証されている<sup>17, 18, 19</sup>。輸送密度の経済性にはCaves et al.(1984)の定義とBrueckner and Spiller(1991)の定義がある<sup>11</sup>。前者では、総費用のインプットに対する弾力性が1より小さい性質を輸送密度の経済性が働くと定義されており、後者ではリンクでの運航費用がリンク交通量に関して遞減的に増加する性質を輸送密度の経済性が働くと定義されている。既存の理論的研究では、モデルに輸送密度の経済性を導入するとき、後者の定義が採用されることが殆どである。ところで、Brueckner and Spiller(1991)流の輸送密度の経済性は、Hendricks他(1995)の解釈以外にも、リンク交通量の増加に伴い使用機材が大型化し、旅客一人当たりに換算した運航費用が減少することを意味するとも解釈可能である。この解釈は、村上(1994)<sup>20</sup>の定義での機材の大型化による経済性(以下、機材規模の経済性と呼ぶ)に他ならない。本稿では、Brueckner and Spiller(1991)の言う $c'(\cdot) < 0$ を機材規模の経済性と解釈した上で分析を進める。

次に、船舶輸送を想定し、輸送密度の経済性を考慮した理論研究として、Mori and Nishikimi(1997)<sup>21</sup>やUeda et al.(1997)<sup>22</sup>がある。前者は、輸送密度の経済が働いている場合に、ハブ・スロークネットワークの形成を通じて地域間交易が行われる可能性を、複数均衡の可能性と共に明らかにしているが、交通企業は明示的に扱われていない。後者は、地域間の交易量が与えられた下で、輸送密度の経済性とハブ・スロークネットワークの形成の関係と共に港湾施設の利用料について分析が行われている。ただし、彼らのモデルで交通企業は、price-takerとして行動する。さらに、港湾運営会社の設定する港湾使用料は、自然独占を理由に政府により平均価格に規制されるとし、何らかの理由により、港湾使用料を引き下げるために政府から港湾運営会社は補助金を受け取る設定になっている。しかし、社会的厚生関数の定義で、港湾運営会社へ補助金が与えられるにもかかわらず、社会全体からその補助金は差し引かれていないところに問題があろう。

さらにKonishi(1998)<sup>23</sup>は、3都市からなる単純な一般均衡モデルにより、規模の経済性を考慮しなくとも、1都市を経由する輸送費が低下すればハブが形成され、荷役労働の必要性が人口集中をもたらすことを示した。そこでは交通需要は財需要に伴う派生需要として扱われ、交通事業者は主体として考慮されないという点で、事業者の寡占性が強い航空市場とは異なる。長期的には路線設定が人口の再配置に通じる可能性はあるが、航空会社の戦略は既存の交通需要を如何に効率的に取り込むかにある

<sup>11</sup> Brueckner and Spiller(1991)の定式化はネットワーク依存であり、一つのODに複数ルートが存在する場合には適用できない。

と考えられるから、このモデルの枠組みを直ちに航空市場の分析に援用することは難しいと考えられる。

## 付録2

旅客の行動に関する仮定の詳細は大橋・安藤(1996)を参考されたい。まず、簡単のため以下の仮定を導入する。

- (P1) 旅客の希望出発時刻が[0,T]に一様に布している。
- (P2) 旅客は、ある特定のリンクで、企業が異なれば異なるルートとして認識し、乗り継ぎも考慮する。
- (P3) 仮定(P1), (M5)より、旅客の平均時間費用<sup>15), 24)</sup>は以下のように与えられる。

$$t' = \sum_{(l,a) \in L(r)} (t_a^l + T/4 \sum_{m \in M} f_{am}^l) \text{ for } i, j \in I, r \in R(i, j)$$

ここに、 $t_a^l$ : ラインホール時間、 $f_{am}^l$ : 便数とする。

- (P4) 旅客の一般化費用は、運賃とパラメータ $\alpha$ による時間費用の金銭換算値の線形結合として表される。

上述の仮定の下で、旅客のルートから得られる効用が $ij$ 間を旅行することにより得られる効用と一般化費用、及び確率的なルートへの効用 $\epsilon'$ の線形結合として表されるとする。さらに $\epsilon'$ が独立で同一のワイブル分布( $\eta + 577/\omega, \pi/6^{0.5}\omega$ )に従い、 $\eta = 0$ とする。ここに $\eta$ はモード、 $\omega$ は分散パラメータとする。このような仮定の下で旅客のルート選択行動は式(1)或いは(1')のように表される。

## 付録3

(7) のラグランジュ関数は、以下のように書ける。

$$\Phi_a = \pi_a + \sum_{l \in \Omega(a)} \mu_a^l (\sum_{m \in M} f_{am}^l V_m - x_a^l) + \sum_{m \in M} \lambda_a^m \{K_a^m T - \sum_{l \in \Omega(a)} (t_a^l + TS) f_{am}^l\} + \delta_a^l \prod_{\substack{m' \in M \\ m' \neq m}} f_{am'}^l$$

ここでKuhn-Tucker条件から、運賃・便数・機材保有数が共に正ならば、これらに対する一階の条件は、

$$\frac{\partial \Phi_a}{\partial p_a^l} = x_a^l + \sum_{l' \in \Omega(a)} (p_a^{l'} - \mu_a^{l'} - SC_a^{l'}) \frac{\partial x_a^{l'}}{\partial p_a^l} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_a}{\partial f_{am}^l} &= \sum_{l' \in \Omega(a)} (p_a^{l'} - \mu_a^{l'} - SC_a^{l'}) \frac{\partial x_a^{l'}}{\partial f_a^l} \\ &\quad - (H_m^l + OC_{am}^l) - \lambda_a^m (t_a^l + TS) + \mu_a^l V_m - \prod_{\substack{m' \in M \\ m' \neq m}} f_{am'}^l = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \Phi_a}{\partial K_a^m} = -k_m + T \lambda_a^m = 0$$

と書くことが出来る。ここで、

$$\frac{\partial x_a^l}{\partial p_a^l} = M1^{l'a}, \quad \frac{\partial x_a^l}{\partial f_a^l} = -\frac{\alpha T}{4(\sum_{m \in M} f_{am}^l)^2} M1^{l'a}$$

とおく。ただし、

$$M1^{l'a} = \sum_{i,j \in I} \sum_{r \in R(i,j)} x^r \sum_{\substack{s \in \Gamma(l,a,i,j) \\ \cap (r(l',a) \in L(r))}} P^s - \sum_{\substack{r \in \Gamma(l,a,i,j) \\ \cap (r(l',a) \in L(r))}} x^r$$

である。 $\Gamma(l,a,i,j)$  は、 $(i,j)$  所与の下で選択可能なルートの内、 $(l,a)$  を構成要素とする集合、すなわち、 $\Gamma(l,a,i,j) = \{r \in R(i,j) | (l,a) \in L(r)\}$  である。 $M1^{l'a}$  に含まれる  $P^r, x^r$  はそれぞれ  $p_a^l, f_{am}^l$  の関数である。

## 付録4

旅客の便益は、次のように書き換える。

$$-\sum_{i,j \in I} \sum_{r \in R(i,j)} \frac{1}{\omega} x^r \ln P^r + \sum_{i,j \in I} \sum_{r \in R(i,j)} (U_{ij} - B^r) x^r$$

数値計算では、旅客の便益を確定項のみで評価する。ここで、確定項についてOD交通量が外生的に与えられるため、OD間で得られる効用は一定であるから、ルートから得られる純便益は、(差し引く項目としての) 旅客の総費用の和にのみ依存することになる。そこで $U_i = 0$  とし、さらに $\omega = 1$ を仮定している。

## 付録5

問題(14)は、旅客市場の均衡条件付き最適化問題であるが、政府が企業や旅客の情報をすべて把握しているという意味で、政府に過剰な情報の優位性を認めている。ところで、均衡条件付き最適化問題には、シエタッケルベルグ問題と呼ばれるものがある。ただし問題(14)は、シエタッケルベルグ問題とは異なる。その理由についてシエタッケルベルグ均衡を解説することにより説明しよう。

シエタッケルベルグ均衡とは、不完全競争の下での企業間競争の一形態として捉えることができる。まず市場参加企業に先導者1名と追随者1名が存在する。ここで追随者は、自己が行動するとき、他社の行動が変化しないと推測(クールノーの仮定)し、先導者は、他社がクールノーの仮定に従って行動するということを知っている。このような状況の下での均衡のことをシエタッケルベルグ均衡と呼ばれている。

この関係をゲーム論的に解釈しよう。先導者は政府で(1主体)で追随者は航空会社(複数)であり、この追随者に追随する旅客(多数)が存在する。このように本稿のモデルはシエタッケルベルグ問題をより拡張したものであると言える。

他方、市場参加主体の関係を経済学的に見ると、前述のように政府と航空会社の間には空港発着枠に関する需給関係(空港発着枠市場)、航空会社と旅客の間には座席に関する需給関係(代替モードも含めて旅客市場)がある。これら各需給関係は「市場」と呼ばれる。

## 付録6

数値計算では、ペナルティ法を用いたアルゴリズムを採用している<sup>25)</sup>。まず問題(14)の目的関数の勾配は、

$$\begin{aligned} & \nabla_{H_{nm}} W_f(H_{nm}, \eta_a(H_{nm})) \\ &= \nabla_{H_{nm}} W_f + \sum_{a \in A_0} \nabla_{\eta_a} W_f \cdot \nabla_{H_{nm}} \eta_a \\ &= \nabla_{H_{nm}} W_f - \sum_{a \in A_0} \nabla_{\eta_a} W_f [\nabla_{\eta_a \eta_a}^2 Pen_a]^{-1} \nabla_{H_{nm}}^2 Pen_a \end{aligned}$$

のように(1×n)のベクトルとして表せる。同様に制約条件のJacobianは(m×n)の行列として、

$$\begin{aligned} & \nabla_{H_{nm}} g_n(H_{nm}, \eta_a(H_{nm})) \\ &= \nabla_{H_{nm}} g_n + \sum_{a \in A_0} \nabla_{\eta_a} g_n \cdot \nabla_{H_{nm}} \eta_a \\ &= \nabla_{H_{nm}} g_n - \sum_{a \in A_0} \nabla_{\eta_a} g_n [\nabla_{\eta_a \eta_a}^2 Pen_a]^{-1} \nabla_{H_{nm}}^2 Pen_a \end{aligned}$$

のように表すことが出来る。ただし、 $Pen_a$ は航空会社の直面する問題のペナルティ関数である。

プログラム設計の際、企業は余分な機材を保有する誘因を持たないため、機材制約が有効であると想定している。次に問題(7)の計算では機種の総数を路線の数だけ掛け合わせた分についてそれぞれ計算を行い、航空会社利潤について比較を行い、利潤が最大となる運賃・便数の組み合わせを求めている。

なお、本稿のモデルでは、一般的に解の唯一性は保証されない。従って数値解は、各パラメータの組の下での1つの解を示すもので、他の解の存在を排除するものではない。しかし、これら局所解の回りで微少な攪乱を与えた場合の局所的安定性は数値的に確認している。解の唯一性・安定性に関する理論的検討は今後の課題としたい。

## 参考文献

- 1) 金本良嗣、山内弘隆:「講座・公的規制と産業4: 交通」,4章, NTT出版, 1995.
- 2) Bittlingmayer, G.: Efficiency and entry in a simple airline network, *International Journal of Industrial Organization*, vol.8, pp.245-257, 1990.
- 3) Brueckner, J.K. and Spiller, P.T.: Competition and mergers in airline networks, *International Journal of Industrial Organization*, vol.9, pp.323-342, 1991.
- 4) Nero, G.: A structural model of intra European Union duopoly airline competition, *Journal of Transport Economics and Policy*, vol.30 (2), pp.137-155, 1996.
- 5) Zhang, A.: An analysis of fortress hubs in airline networks, *Journal of Transport Economics and policy*, vol.30(3), pp.293-307, 1996.
- 6) Hendricks, K., Piccione, M. and Tan, G.: The economics of hubs: the case of monopoly, *Review of Economic Studies*, vol.62, pp.83-99, 1995.

7) 前掲3)

- 8) Hansen, M.: Airline competition in a hub-dominated environment: an application of noncooperative game theory, *Transportation Research*, Vol.24(1)-B, pp.27-43, 1990.
- 9) 例えば、稻村謙、久永幸之: 航空機材スケジューリングのためのニューラルネットワークの開発, 土木学会論文集, vol.IV-31, pp.9-21, 1996.
- 10) 航空政策研究会:「現代の航空輸送」, 勉草書房, 1995.
- 11) Borenstein, S.: Airline mergers, airport dominance, and market power, *American Economic Review*, vol.80(2), pp.400-404, 1990.
- 12) Morrison, S.A. and Winston, C.: *The Evolution of Airline Industry*. Washington, D.C.: Brookings Institution, 1995.(郭賢泰訳:「規制緩和の経済効果」, 第一部, 日本評論社, 1997.)
- 13) 加藤雅:「規制緩和の経済学」, 第6章, 東洋経済新報社, 1994.
- 14) Oum, T.H., Zhang, A. and Zhang, Y.: A note on optimal airport pricing in a hub-and-spoke system, *Transportation Research*, vol. 30(1)-B, pp.11-18, 1996.
- 15) 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, Vol.2, pp.133-144, 1996.
- 16) Sasaki, K.: Travel demand and the evaluation of transportation system change: reconsideration of random utility approach, *Environmental Planning A*, vol.14 pp.169-182, 1982.
- 17) Caves, W.C., Christensen, L.R. and Tretheway, M.W.: Economies of density versus economies of scale: why trunk and local service airline costs differ, *RAND Journal of Economics*, vol.15(4), pp.471-489, 1984.
- 18) Brueckner, J.K., Dyer, N.J. and Spiller, P.T.: Fare determination in airline hub-and-spoke networks, *RAND Journal of Economics*, vol.23(3), pp.309-333, 1992.
- 19) Brueckner, J.K. and Spiller, P.T.: Economies of traffic density in the deregulated airline industry, *Journal of Law and Economics*, vol.37, pp.379-415, 1994.
- 20) 村上英樹: 国内航空運賃・費用の計量分析, 神戸大学経営学部研究年報, vol.40, pp.67-92, 1994.
- 21) Mori, T. and Nishikimi, K.: Bulk economies in transportation and industrial location, mimeo, 11th Applied Regional Science Conference, 1997.
- 22) Ueda, T., Komori, T., Miyagi, T. and Morisugi, H.: On the benefit of projects for transport network with increasing returns: economic evaluation of hub port development, mimeo, International Symposium on Economic and political Dynamics and Sustainable Development in Asia: Infrastructure as Complex Systems, 1997.
- 23) Konishi, H.: Hub cities: city formation without economies of scale, Discussion Paper No.A-36, Center for the Study of Complex economic Systems, 1998.
- 24) Milan, J.: A model of competition between high speed rail and air transport, *Transportation Planning and Technology*, vol.17, pp.1-23, 1993.
- 25) 清水清孝:「多目的と競争の理論」, 共立出版, 1982.

(1998.1.30受付)

## A STUDY ON THE HUB-SPOKE NETWORK AND LANDING FEE POLICY IN THE AVIATION MARKET

Tadahiro OHASHI and Asao ANDO

Passengers, airlines, and airport managers are the agents in the aviation market. Recent economic analyses (on the matter) have mostly been confined to the passenger market, where airline networks are given exogenously. Naturally, such framework is unsuitable for the discussions concerning airport management, or the emergence of hub-spoke networks. In this paper, we construct the behavior-based models for respective participants in the market. Then we identify the condition under which a hub-spoke network is formed, and examine the effect of landing fee policy on the market structure.