

シュタッケルベルグ均衡による国内航空ネットワーク分析*

*Stackerberg Equilibria Analysis of Air Transportation Network**

黒田勝彦**、竹林幹雄***、三保木悦幸****

By Katsuhiko KURODA**, Mikio TAKEBAYASI***, Yoshiyuki MIHOKI****

1. はじめに

わが国では、経済成長にともない、輸送交通機関の高速化が図られてきた。それとともに、国内航空需要は飛躍的に増加し、空港整備も進められてきた。しかし、効率的な空港整備を図るためには、種々の航空政策が航空ネットワーク、乗客のフローに如何なる影響を及ぼすかを分析することが重要である。

航空旅客需要予測の分野では所与の航空ネットワークの下での需要を予測するモデルに関する研究は過去に数多く存在する¹⁾²⁾。しかし、これらでは航空会社の行動戦略を考慮していない、航空会社と旅客の間の「均衡」を明示的に取り扱っていないなどの点が問題である。また、高瀬ら³⁾は航空会社と旅客の行動を考慮したモデルを開発したが、ここでは解がパラメータの推計法に依存するという問題が存在する。

本研究では上記の目的のために、集計的アプローチにより精度の高いモデルの構築を目的としている。国内輸送市場への参加主体として航空会社、鉄道会社、旅行者を取り上げ、これら3者の行動から均衡解を導くことにより航空政策の影響を考察する。具体的には現行ネットワークにおけるモデルの再現性の検証を行った後、国内ハブ空港導入というシナリオに基づく政策シミュレーションを行い、今後の航空ネットワーク整備について検討を行った。なおデータとしては平成3年度幹線旅客純流動調査⁴⁾を利用した。

2. モデル構造と定式化

参加主体の関係として、航空会社（ここでは航空会社間の競合は内生的には取り扱わないこととする）と鉄道会社については競合関係とし、また旅行者は航空会社と鉄道会社が提示した戦略に基づいて行動するので、この2者と旅行者の関係については、シュタッケルベルグ問題⁵⁾であると仮定してモデルの構築を行った。

ここで、シュタッケルベルグ問題とは、以下の特徴を持つ非零和2人非協力ゲームのことである。

- 1) ゲームの参加者として先手と後手が存在する。
- 2) 先手は後手の行動に関して完全情報を得る。後手の行動は先手の行動に影響される。

ただし、本研究では、航空会社の戦略が航空旅客市場に及ぼす影響を主に調べるので、鉄道会社は戦略を有しない主体であるとした。これは鉄道は航空路線と競合する長距離輸送だけではなく、近距離輸送なども含めた形での戦略を採っていると考えられ、航空会社の戦略に敏感に呼応する戦略ではないと考えたためである。

図-1に本研究でのネットワークと経路の概念図を示す。

(1) 航空会社の行動

航空会社（キャリアー）は、旅行者の経路選択行動が最適化されることを前提条件として、自己の利潤を最大化する戦略をとるものとする。

キャリアーの利潤は、収入としては路線の運賃から得られる運賃収入、支出としては機材を運行する際にかかる運行費用（航空機機材費、人件費、航空燃油費など）、空港に着陸する際にかかる空港使用料（着陸料、施設使用料）から構成されると考えられる。

* Key Words : 空港計画、配分交通

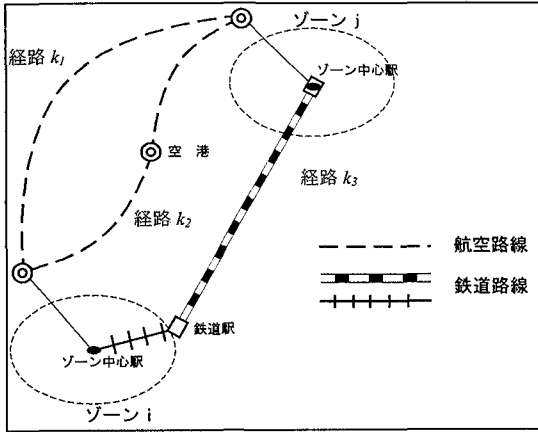
** フェロー会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科

*** 正会員 工修 神戸大学助手 工学部建設学科

**** 学生員 神戸大学大学院 自然科学研究科 建設学専攻

(〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)

TEL & FAX 078-803-1016)



図ー1 ネットワークと経路の概念図

ここで、キャリアーの行動の定式化を以下に示す。

$$\max_{l \in La} B(y^l) = \sum_l \sum_i \sum_j \sum_k \delta_{ijk}^l \cdot x_{ijk} \cdot p^l - \sum_l \sum_m y_m^l (\delta_h^l \cdot LC_m^h + AC_m^l) \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_l \sum_m \delta_h^l \cdot y_m^l \leq CP^h \quad (\text{for } \forall l \in La) \quad (2)$$

$$y_m^l \geq 0 \quad (\text{for } \forall l \in La) \quad (3)$$

and 旅行者の行動式 s. t. 制約条件式

ここで、 x_{ijk} ; i, j 間 k 経路の旅行者数。

δ_{ijk}^l ; クロネッカーデルタ

δ_{ijk}^l : $\begin{cases} 1: i, j \text{ 間 } k \text{ 経路がリンク } l \text{ を含む} \\ 0: \text{それ以外} \end{cases}$

p^l ; リンク l の航空運賃。

y_m^l ; リンク l に投下される機材 m の運行頻度。

LC_m^l ; ターミナル h における機材 m のターミナル使用料。

AC_m^l ; リンク l に投下される機材 m の 1 フライト当たりのターミナル使用料を除く運行費用。

CP^h ; ターミナル h の容量。

δ_h^l ; クロネッカーデルタ

δ_h^l : $\begin{cases} 1: \text{リンク } l \text{ がターミナル } h \text{ を発着ターミナルとする} \\ 0: \text{それ以外} \end{cases}$

λ ; ロードファクター (=0.7)。

La ; 航空路線の集合。

ここで、ターミナル使用料、及び運航費用は外生的に固定的に与えられるものとする。これは、ターミナル使用料に関しては、空港管理者によって決定されるものであり、運航費用に関しては運行回数に関わらず一定であると仮定したためである。

(2) 旅行者の行動

旅行者（ユーザー）の行動は、航空会社、鉄道会社の路線、サービス頻度、所要時間ならびに運賃を知らされた後に、自己の経路選択行動を最適化することとする。

本研究では旅行者の行動基準として、総旅行時間最短、総旅行費用最小、時間価値を考慮した一般化費用最小の3種を設けた。以下に1例として総旅行時間最短基準の場合の行動式を示す。

$$\min T(x_{ijk}) = \sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} \cdot t_{ijk} = \sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} \left\{ t_{ijk}^{ai} + \sum_{l \in L} \delta_{ijk}^l \cdot t^l + \sum_{l \in L} \delta_{ijk}^l \cdot \frac{OT^h}{2 \sum_m y_m^l} \right\} \quad (4)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_k x_{ijk} = X_{ij} \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k \delta_{ijk}^l \cdot x_{ijk} \leq \lambda \sum_m y_m^l \cdot CAP_m^l \quad (\text{for } \forall l \in L) \quad (6)$$

$$x_{ijk} \geq 0 \quad (7)$$

ここで、 t_{ijk} ; i, j 間 k 経路の総旅行時間。

t_{ijk}^{ai} ; i, j 間 k 経路のアクセス+イグレス時間。

t^l ; リンク番号 l のリンクの旅行時間。
 OT^h ; ターミナル h の営業時間。
 X_{ij} ; i j 間の旅行者数。
 K ; 航空路線を使用する経路の集合。
 CAP_m^l ; リンク l に投下される機材 m の機材容量。
 L ; リンクの集合で航空路線 (L_a)、鉄道路線 (L_r) によって構成される。

(3) 状況設定

本研究では、モデルの再現性検証のために以下に示すような状況設定を行った。

- 1) 鉄道会社の戦略は現状の 1 種類とする。
- 2) 関西国際空港開港以前のネットワークを再現性検討の対象とする。
- 3) 対象とする空港ではジェット機が就航する。
- 4) 航空機材はサービス頻度を満足する投入数として具体的なスケジュール問題を取り扱わないようにする。また、同一路線間の機材は 1 種類とする。
- 5) OD 旅客数は都道府県間旅客流動数とし、ネットワークの変化によって OD パターンは影響を受けないものとする。
- 6) アクセス交通に関しては待ち時間を考慮しないものとする。
- 7) 隣接した都道府県間では自動車及び鉄道による移動が主要手段であると考えられるため、航空による移動は取り扱わないこととする。ただし、北海道、沖縄は除く。
- 8) 空港までのアクセス時間が 150 分以内の場合のみ航空利用可能であるとした。
- 9) ユーザーの時間価値を算出する際に用いる換算係数 α は年間平均個人所得と年間平均総労働時間から次式で求めるものとする。

$$\alpha = \text{平均年間所得 (円)} / \text{平均年間総労働時間 (分)}$$

上式により平成 3 年では $\alpha = 30$ (円/分) を標準とし 50, 100 (円/分) と変化させ感度分析を同時に行った。

3. ケーススタディ

(1) 旅客行動モデルの再現性の検討

まず、平成 3 年度における国内全域のネットワークを対象としてケーススタディを行った。航空路線および運行頻度を現行のままとして、各行動基準における路線別利用者数を求めることにより、最も再現性に優れた行動基準の検証を行った。このときハブ機能を持つ空港を、東京国際空港、大阪国際空港の 2 空港とした。ここでハブ機能を持つ空港とは、乗り継ぎ可能な空港を意味する。

結果として、旅行者の行動を時間最短基準とした場合に、最も高い再現性が得られた。ここで、各行動基準における実績値⁶⁾⁷⁾⁸⁾と推定値の相関係数を表-1に示す。

表-1 計算結果

	相関係数
総旅行時間最小	0.982
総旅行費用最小	0.034
一般化費用最小	0.940

表から総旅行時間最小基準の相関係数が最も高いことが分かる。

また、時間価値の変化に伴う相関関係の推移を検証した。その結果、時間価値を上昇させることにより、その相関性も高まるが、その上昇は時間最短基準の相関係数に漸近的であることが認められた。

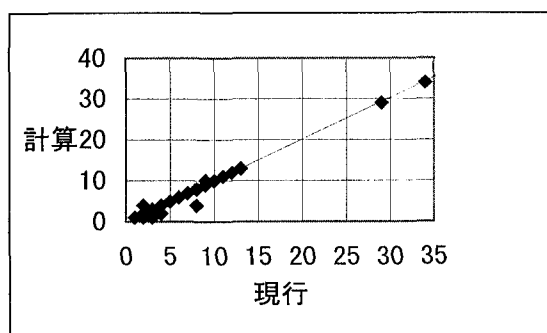
このことから時間最短が旅行者の行動基準として最も適すると考えられる。

次に、この総旅行時間最短基準を用いて、航空会社の利潤を最大化する頻度パターンの探索を行った。ここでは政府による規制を考慮して、既存路線の廃止は行わず、最小 1 便を投入するという制約を設けて解の探索を行った。その結果、表-2、図-2に示すように、本モデルによる運行頻度の再現性が高いことが示された。

なお、図-2において現行より過小評価された路線は大阪-高松間のような近距離の地方路線であり、これらはモデルで考えている出発空港での待ち時間が非常に長くなったためであると考えられる。同様に過大評価されている路線は東京-鹿児島間のよう

表－２ 主要路線における再現性

航空路線	運行頻度(便／日)	
	均衡値	現行値
東京－札幌	34	34
東京－大阪	13	13
東京－福岡	11	11
東京－那覇	29	29
東京－広島	10	10
大阪－札幌	10	10
大阪－福岡	7	7
東京－鹿児島	9	8



図－２ 路線別投入頻度の比較

な遠距離路線である。これらに関しては特定の路線に関して、与えたロードファクターよりも高い比率で旅客が利用しているためであると考えられる。

(2) 政策シミュレーション

ここでは、開発されたモデルを用いて、国内航空ネットワークにハブ機能を持つ空港を加えることで生じるネットワーク及び旅客流動の変化についてのケーススタディを行った。

各ケースの内訳を以下に示す。なお、ここでいう最適性とは、短期的な最適性についてであり、長期的な最適性ではないことを断っておく。

SIM1: 関西国際空港が開港した時点でのネットワークにおける運行頻度を用いて、路線別旅客数ならびに航空会社の利潤の推定を行う。

SIM2: 開港当時のネットワークパターン(路線の廃止、新設なし)での最適頻度パターン探索および航空会社の利潤の変化・旅客流動の変化を検討する。

SIM3: ネットワークの形状を Hub & Spoke 型⁹⁾とし、東京国際空港、大阪国際空港、関西国際空港の3空港をハブ空港として取り扱う場合のサービス路線ならびに頻度パターンを探索し、航空会社の利潤変化、旅客流動及び総旅行時間変化を検討する。

SIM4: SIM3 のネットワークから仮想的に大阪国際空港のみを廃止した場合の Hub & Spoke 型ネットワークでのサービス路線ならびに頻度パターンを探索し、航空会社の利潤変化、旅客流動及び総旅行時間変化を検討する。このとき、大阪国際空港の空港容量をそのまま関西国際空港へ上乗せするものとする。

また、ケーススタディを行う際の前提条件を以下に示す。

- 1) 1994 年の OD 旅客数として、1991 年の OD 旅客数¹⁾に国内輸送旅客人員の成長率を乗じた推定値を用いるものとした。今回用いるこの期間中の成長率は 4% とした^{6) 7) 8)}。
- 2) 空港容量⁶⁾の制約は、すべて与えられるものとする。例えば、東京国際空港は 400 便／日、大阪国際空港は 300 便／日、関西国際空港は 200 便／日とする。ただし、1 便当たり離着陸回数は 2 回／便である。
- 3) その他の前提条件については、モデルの状況設定の際に用いたものと同じ前提条件を用いるものとする。

各ケーススタディの結果の一覧を図－3、図－4 に示す。ただし、航空会社の利潤については関西国際空港が導入されていない場合を基準値として表記している。また、旅客一人当たりの平均旅行時間については、航空旅客の平均旅行時間ではなく、鉄道利用者を含めた全旅行者の平均旅行時間を示したものである。これは、航空会社の戦略変更の、全旅行者に対する影響を把握するために設定した。

この場合、SIM1、SIM2 の利益が関西国際空港開港前に比べて減少しているのは、既存路線が関西国際空港開港のメリットを損ねているためであると考え

図-3 航空会社の利潤変化

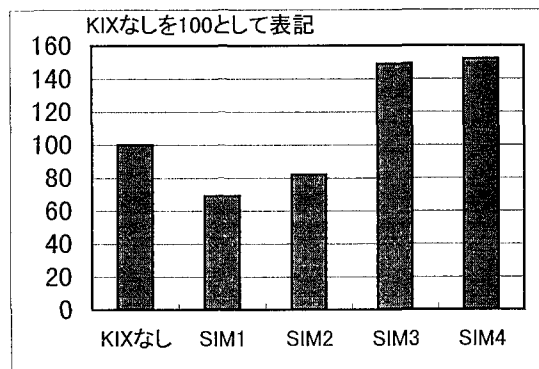
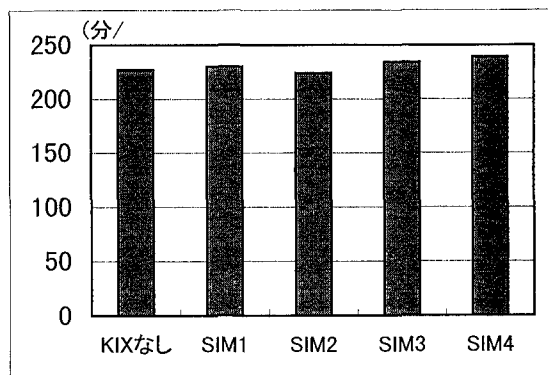


図-4 1人当たり平均旅行時間の変化

られ、既存路線を含めたネットワークでは航空会社の利潤の極大化には寄与しないことがわかる。

(3) Hub & Spoke 型ネットワーク導入の効果

図-3、図-4より関空開港当時のネットワーク(SIM2)と比較して、Hub & Spoke 型ネットワークを導入する(SIM3, SIM4)ことにより航空会社の利潤を増大させる結果を得た。これは Hub & Spoke 型ネットワークにすることによって営業路線の集約がなされ、効率のよい路線運行が可能となるためである。その一方で、平均旅行時間は増加する結果を得た。1人当たりの平均旅行時間の増加は最大で10分となる。これは Hub & Spoke 型ネットワークでは、地方空港間の移動には、多くの場合乗り継ぎを行う必要があるためである。また、表-3は各ハブ空港における空港利用者数、および乗り継ぎ客の割合を示したものである。これより、Hub & Spoke 型ネット

ワークを導入し、航空会社が最適戦略をとった場合、航空路線利用者の減少が生じる結果を得た。

次に、大阪国際空港を存続させた場合(SIM3)と廃止した場合(SIM4)についての比較を行う。大阪国際空港を廃止した場合では航空会社の利潤増加は2%にすぎない。また、一人当たりの平均旅行時間も約2%増加する。

さらに表-3より、大阪国際空港廃止による航空路線利用者数の伸びは0.3%にとどまることがわかる。

この結果から、大阪空港を廃止することにより、航空会社の営業効率は軽微な改善にとどまり、大阪空港を廃止する効果は決して大きなものではないことがわかる。逆に、利用者にとっては大阪国際空港を廃止されることにより、航空路線の利用機会は若干増大するが、逆に所要時間の増大を見込まなければならぬということになる。

4. まとめ

本研究では、航空旅客輸送市場がシュタッケルベルグ均衡によって記述できることを示した。日本国内の航空ネットワークを例として、関西国際空港開港時の旅客流動の再現と、ネットワークが Hub & Spoke 化された場合のネットワークフローと航空会社の利潤への影響を評価した。そして、航空会社にとって、航空ネットワークの効率的運用のためには Hub & Spoke 化が有用であることを指摘した。さらに、関西国際空港導入後におけるシナリオ分析として、大阪国際空港存続の場合と廃止した場合を取り上げ、大阪国際空港廃止に伴う運営効率の改善効果は大きくは期待できないことを示した。

しかし、本モデルでは、以下のような課題が残されている。

- 1) 旅行者の行動モデルでの待ち時間の算出方法として平均待ち時間を採用した。このため特にハブ空港での乗り継ぎに過大・過小な時間が与えられる場合があった。このため、待ち時間の概念に何らかの改良を加えることが必要である。
- 2) 航空会社の戦略は機材投下数の他に、路線運賃が考えられ、両者を同時に決定する構造を取り

表－3 主要空港における利用者数

		関空なし	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4
全利用者数 (人／日)	東京国際	123,508	126,840	126,840	115,343	122,232
	大阪国際	50,008	35,423	36,310	29,056	*****
	関西国際	*****	17,015	20,253	17,253	39,795
乗り換え 利用客 (人／日)	東京国際	3,143	3,796	3,757	5,797	4,959
	大阪国際	5,013	3,403	3,199	2,707	*****
	関西国際	*****	2,131	3,036	5,734	7,682
乗り換え率	東京国際	0.025	0.030	0.030	0.050	0.041
	大阪国際	0.100	0.096	0.088	0.093	*****
	関西国際	*****	0.125	0.150	0.332	0.193

入れる必要がある。同時に、機材の運用費用に関しても、機材投入数と運営費用との間に規模の経済を考慮していない。この点に関しても今後改良する必要がある。

3) ゾーン間の OD はネットワークの状態に依存しない、という仮説を設けているが、現実にはゾーン間のアクセス性の変動により、中・長期的には OD 交通量そのものも変動すると考えられる。このためゾーン間交通の発生過程をモデルに組み込む必要がある。

今後の展開としては、まず適用範囲の拡大が考えられる。航空旅客輸送市場は、構造的には国際航空ネットワークを取り上げた場合も同様であると考えられる。このため、国際航空旅客市場を対象としてモデルの適用を行うことが考えられる。また、課題 3) でも述べたように、空港というターミナルの整備はゾーン間交通量、強いては地域構造そのものにも影響を与えるものと考えることができる。このため、長期的な影響を議論できる空港整備計画モデルとして発展させるためには、空港背後圏の社会・経済的な変化を求める地域計画モデルとの結合の可能性を検討する必要がある。

【謝辞】

本研究を進めるにあたり、多くの方々から有益な指摘を受けました。特に、鳥取大学 喜多秀行教授にはモデル構成その他において重要な指摘をいただ

きました。また、レフェリーの方々にも今後研究を進めていく上での貴重な示唆を受けました。付して謝辞といたします。

《参考文献》

- 1) 古市正彦, Koppelman, F. S. : 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, No11, pp. 239-246, 1993.
- 2) 森地茂, 屋井鉄雄, 兵藤哲朗: わが国の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, pp. 27-36, 1994.
- 3) 高瀬達夫, 森川高行: 航空会社の便数設定と利用者の空港選択の均衡を考慮した国際航空需要分析, 土木計画学研究・講演集 No. 18(1) 1995. 12 pp169-172
- 4) 運輸経済研究センター編: 平成3年度幹線旅客純流動調査
- 5) 細江守紀編著: 非協力ゲームの経済分析, 勁草書房
- 6) 運輸省編: 航空統計年報, 1995.
- 7) 航空振興財団: 数字でみる航空, 1991.
- 8) 運輸白書: 運輸省, 1995.
- 9) Kanafani, A, Ghobrial, A. A : AirLine Hubbing- Some Implications for Airport Economics, transportation Research A 19・A No.1 pp15-27 1985.

本研究は国内航空旅客市場をキャリアー（航空会社、鉄道会社）を先手、利用者を後手としたシュタッケルベルグ均衡問題として定式化した。航空会社は利潤最大化を目的とし、その戦略はサービス路線とその機材投下数である。利用者は1991年時点での再現性検討から総旅行時間最小化を目的とした。次に、KIX開港以降の国内航空ネットワークを最適化した場合の旅客流動への影響把握を行った。その結果、hub & spoke型ネットワークの形成により航空会社の利潤は著しく改善され、逆に利用者の平均旅行時間は増大し、航空路線利用機会は減少することが認められた。さらに大阪国際空港廃止の効果は余り期待できない結果を得た。

Stackelberg Equilibria Analysis of Air Transportation Network

by Katsuhiko KURODA, Mikio TAKEBAYASHI and Yoshiyuki MIHOKI

Air transportation market is analyzed as the Stackelberg equilibria between airlines and passengers. The airlines' behavior is formulated so as to maximize their net revenue while the passengers' behavior is formulated so as to minimize the total travel time. Application to the present domestic transportation network shows the model well fits with the observed. The paper also investigates the equilibrium flow before and after KIX is opened. The computed results say the net revenue of airline company increases if KIX is used as the hub-airport. However, the passengers are made inconvenient in the sense of average travel time increase.