

シュタッケルベルグ均衡による国内航空ネットワークの最適化*

Stackerberg Equilibria Analysis of Air Transportation Market*

黒田勝彦**, 竹林幹雄***, 三保木悦幸****

By Katsuhiko KURODA**, Mikio TAKEBAYASHI***, 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、航空ネットワークをより有効に機能させるために、利便性が高く、効率性の高いネットワークの形成が必要である。

本研究では国内航空ネットワークの最適化を検討するために、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。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ネットワークの最適化を行う。また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者と旅行者については、シュタッケルベルグ均衡関係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。

図-1に本研究でのネットワークモデルの概念図を示す。

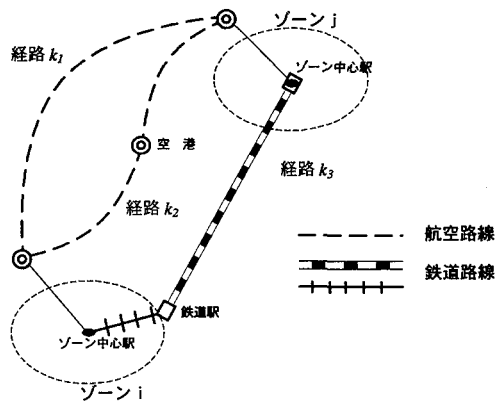


図-1 航空ネットワークの概念図

(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)から構成され则认为られる。

* Key Words ; 空港計画

** JIB-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)

ここで、キャリアーの行動の定式化を以下に示す。

$$\max B(y^l) = \sum_l \left\{ \sum_i \sum_j \sum_k \delta_{ijk}^l \cdot x_{ijk} \cdot p^l - y^l (LC^h \cdot \delta_h^l + AC^l) \right\} \quad (1)$$

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

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

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 ; i j 間 k 経路のリンク l についてのクロネッカー δ で i j 間 k 経路がリンク l を通るときに 1 をとり、それ以外は 0 をとる。

p^l ; リンク l の航空運賃。

y^l ; リンク l の運行頻度。

LC^h ; 空港 h の空港使用料。

AC^l ; リンク l を通るときの片道当たりの、空港使用料を除く運行費用。

CA^l ; リンク l の機材容量。各リンクには 1 種類の機材のみとし、リンクに固有の値とする。

CP^h ; 空港 h の空港容量。

δ_h^l ; リンク l の空港 h についてのクロネッカー δ でリンク l が空港 h を発着空港とするときには 1 をとり、それ以外は 0 をとる。

λ ; ロードファクター (=0.7)。

L ; 航空路線の集合。

(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規範として、総旅行時間最短、総旅行費用最小、時間価値を考慮した総費用最小の 3 種を設けた。以下に 1 例として総旅行時間最短規範の場合の行動式を示す。

$$\begin{aligned} \min T(x_{ijk}) &= \sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} \cdot t_{ijk} \\ &= \sum_i \sum_j \sum_k x_{ijk} \left\{ t_{ijk}^{ai} + \sum_l \delta_{ijk}^l \cdot t^l + \sum_l \delta_{ijk}^l \cdot \frac{OT^h}{2y^l} \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

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

$$\sum_i \sum_j \sum_k \delta_{ijk}^l \cdot x_{ijk} \leq \lambda \cdot y^l \cdot CA^l \quad (\text{for } \forall k \in K) \quad (6)$$

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

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。

(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ている。

- 1) 鉄道会社の戦略は 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 1 機が 1 日に 1 回のみ運行するものとして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影響を受けないとする。
- 6) アクセス交通に関しては待ち時間を考えないものとする。
- 7) 隣接した都道府県間では自動車利用による移動が無視できないと考えられるため、取り扱わない。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 は平均年間所得と平均年間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) での計測も行った。

3. ケーススタディ

(1) 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。運行頻度を現行のまま変化させないものとして、各行動規範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規範の検証を行った。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。

結果として、旅行者の行動を時間最短規範とした場合に、最も高い再現性が得られた。ここで、各行動規範における実績値と推定値の相関係数ならびに分散を表-1に示す。

表-1 計算結果

	相関係数	分散
総旅行時間最小	0.98162	270882
総旅行費用最小	0.03957	5318634
時間価値費用最小	0.94045	765738

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規範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規範として最も適しているといえる。

次に、総旅行時間最短規範を用いて、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。この結果、表-2に示すように、運行頻度の再現性が高いことが示され、平成3年時の頻度パターンが航空会社にとって最適な頻度パターンであることがわかった。

表-2 主な路線のモデルの適用結果

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

(2) 政策シミュレーション

ここでは、我々の開発したモデルを用いて、国内航空ネットワークにハブ空港を加えることで生じるネットワークの変化についてのシミュレーションを行った。

行ったシミュレーションを、以下に示す。

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推定を行う。

SIM3:ネットワークの形状をHub & Spoke型とし、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最適ネットワークならびに頻度パターンを探索する。

SIM4:SIM3のネットワークから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最適ネットワークならびに頻度パターンを探索する。

また、シミュレーション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。
- 2) 空港容量の制約は、すべて与えられるものとする。例えば、東京国際空港は250便/日、大阪国際空港は150便/日、関西国際空港は250便/日とする。
- 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。

ここで、各シミュレーションの結果を図-3、4に示す。

(関空なしを100とした)

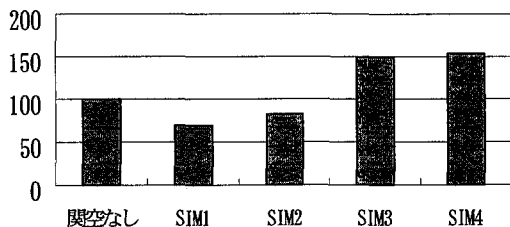


図-3 航空会社の利潤の比較

(分)

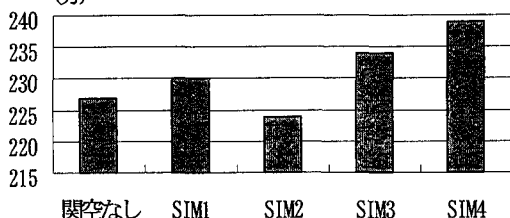


図-4 1人あたりの旅行時間の比較

(3) 考察

開港当時のネットワークと比較して、Hub & Spoke型ネットワークのほうが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、効率性の高い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した。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。しかし1人当たりの旅行時間の増加は10分程度であり、時間面の影響は軽微であるといえる。

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ほとんど改善されず、大阪空港を廃止する効果はほとんどないことが分かる。なお各ハブ空港における乗り継ぎ客の割合を表-2に示す。

表-2 ハブ空港における乗り換え率

		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

4. まとめ

本研究では、航空旅客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、日本国内の航空ネットワークを例にとり、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。

しかし、本モデルでは、旅行者の行動モデルでの待ち時間の算出方法に改良の余地がある。

また、今後の課題としては、OD旅行者数の変化を考慮したモデルの構築を行う必要があると思われる。

《参考文献》

- 1) 黒田勝彦, 竹林幹雄, 三保木悦幸, 春名薫: シュタッケルベルグ問題としての航空ネットワーク分析, 土木学会年次講演概要集 No. 50 1995 pp780-781
- 2) Kanafani, A, Ghobrial, A. A : AirLine Hubbing- Some Implications for Airport Economics, transportation Research A 19・A No. 1 pp15-27 1985
- 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) 細江守紀編著: 非協力ゲームの経済分析, 勁草書房
- 5) 数字でみる航空: 航空振興財団, 1991
- 6) 91年度幹線旅客純流動調査: 運輸経済研究センター
- 7) 運輸白書: 運輸省, 1994. 11
- 8) 時刻表: JTB, 1992, 1994