

航空ネットワークの形成に及ぼすエアポートセールスの効果に関するモデル分析*

Airport Sales and its Influence on the Formation of Local Aviation Network: A Model Analysis*

喜多秀行**・坂田裕彦***・谷本圭志****

By Hideyuki KITA**, Hirohiko SAKATA*** and Keishi TANIMOTO****

1. はじめに

航空規制緩和の進展と競争の激化を受け、自治体はより利便性の高い航空旅客サービスを実現するために、航空路線の誘致行動を活発に展開している。航空運賃や運行頻度といったサービス水準を変化させると、当該路線の需要変化だけでなく、その路線を経由する全てのOD間の需要に変化が生じるといった外部性が働くため、航空路線の誘致行動は、自己の行動が他の自治体の行動に影響を及ぼし、同様に他の自治体の行動が自己の行動に影響を及ぼすような相互依存の関係にある。そのため、同じ行動をとっても他の自治体の行動によって実現するサービス水準に違いが生じる。各自治体は互いにこれを考慮した上で自己の航空旅客サービスの最大化を図る。

また、航空路線の誘致行動は1度限りで終了するものではなく、何度も繰り返すことで高いサービス水準を実現していくものである。現在の路線誘致行動が将来の行動選択の範囲を限定するという経路依存性が存在するため、短期的に高い航空旅客サービス水準をもたらす路線誘致行動が、長期的にも高いサービス水準をもたらすとは限らない。そのため、効果的な路線誘致を実現するためには、長期的なネットワークの形成過程を評価する必要がある。

航空ネットワークの形成過程を分析するための方法論については多くの蓄積があるが¹⁾²⁾、その多くは航空企業の行動に主眼がおかれ、自治体の誘致行動という観点から分析・評価を行ったものは見あたらない。自治体によるエアポートサービスには、航空企業への陳情型が少なからず見受けられるが、航

空企業は基本的には営利企業であり、利益を度外視して陳情に応じる、ということは通常あり得ない。できうるならば航空企業にも利益をもたらす、そうでない場合にも少なくとも負担を求めない範囲で意図を達成することを考えるべきであろう。

そこで本研究では、自治体の路線誘致行動におけるネットワーク形成過程を n 人非協力ゲームの繰り返しと見なして分析し、効果的な路線誘致行動を見出すためのひとつの方法論を提案する。

なお、自治体の路線誘致行動は経路と便数を意味し、それによって航空企業の利潤が減少する場合には一定の範囲内で補助を行うことを想定して自地域の航空旅客サービス水準の向上を検討する。

2. 分析モデル

(1) モデル化の考え方

ほとんどの地方空港では、空港そのものの整備はしかるべき水準までなされていても保有する航空路線が十分でなく、機能を十全には発揮し得ていない状態にある。地方空港を運営・管理する主体は一般に地方自治体であり、これらの自治体は航空旅客サービスによりもたらされる地域の発展と厚生水準の増大を願っている。しかし、羽田をはじめとする主要空港の容量不足もあって、地方空港を抱える自治体の増便や新規路線への取り組みは誘致合戦の様相を呈している。

このような状況を踏まえ、本研究では自治体間で増便や路線誘致に関してゲーム状態にあるとらえる。そして、自治体が展開する誘致行動を踏まえて航空ネットワークが形成されていくと考え、一連の状態の推移を繰り返し n 人非協力ゲームとしてモデル化する。その際、自治体が航空企業に対しある一定範囲内で運航補助を行い、路線開設や増便のインセンティブを与える場合が少なからず見られることに鑑み、その行動をモデル化する。また、主要空港の容量制約の影響を検討するため、容量制約が顕在化し

*キーワード：空港計画、空港管理、整備効果計測法

**正会員、工博、鳥取大学工学部社会開発システム工学科（鳥取市湖山町南4-101、TEL:0857-31-5310、FAX:0857-31-5309）

***正会員 修士（工学）（株）オリエンタルコンサルタンツ九州支社（福岡市博多区博多駅前3-10-24、TEL:092-411-6209、FAX:092-411-3086）

****正会員 博士（工学）鳥取大学工学部社会開発システム工学科（鳥取市湖山町南4-101、TEL:0857-31-5311、FAX:0857-31-5310）

ている主要空港とまだまだ余裕のある地方空港の行動規範の差異を明示的に取り扱う、

各自治体の利得は空港のサービス圏に居住する利用者の消費者余剰の増分と路線誘致にかかる費用の差とする。消費者余剰は利用者と航空企業の行動を記述したネットワーク均衡モデル^{3) 4)}により導出する。このモデルでは航空と鉄道の競合を考慮しているが、航空企業の行動と利用者の行動の均衡を主として取り扱うため鉄道の運賃と運航頻度は所与としている。現象再現性は比較的良好であることが確認されている。なお、本研究では航空企業1社、鉄道企業1社とする。

(2) プレイヤーと戦略の定義

地方空港を所有する自治体をプレイヤー $I = \{1, \dots, i, \dots, j, \dots, I\}$ 、その戦略の集合を $G = \{g_1, \dots, g_i, \dots, g_j, \dots, g_I\}$ 、自治体 $i \in I$ の戦略集合を $g_i = \{g_{i1}, \dots, g_{i1 \rightarrow 2}, g_{i1 \rightarrow 3}, \dots, g_{i1 \rightarrow I}, g_{i2}, \dots, g_{i2 \rightarrow 3}, \dots, g_{i2 \rightarrow I}\}$ とする。ただし、添字 k は自発的には路線誘致行動をとらない主要空港を示す。自治体 i の自治体 j に対する戦略集合 g_{ij} は、誘致する往復便数を x_{ij} とすると、 $g_{ij} = \{2x_{ij}\}$ となる。航空企業の保有機材は有限であり、短期における戦略には以下のような制約があると考え、

$$\sum_{j \in K} g_{ij} \leq R \quad (1)$$

$$g_{ij} \in g_i \text{ かつ } g_{ij} \geq 0$$

R は1期に行いうる運航頻度の増分の上限である。減便は路線の運航頻度が0になるまで可能とする。

(3) 利用者の行動

利用者は、所与の所得 y_i と交通企業 m が供給する旅客サービスの運行頻度 $F_{\phi_{ij}}^m$ 、運賃 $P_{\phi_{ij}}^m$ 、所要時間 $T_{\phi_{ij}}^m$ によって構成される一般化費用 $p_{\phi_{ij}}^m$ により規定される効用を最大化する経路 ϕ_{ij} および需要量 $X_{\phi_{ij}}^m$ を選択する。出発希望時刻は $[0, E]$ の範囲で一様に分布しており、帰路は往路と同じルートを選択するものとする。都市 i に居住する利用者の間接効用関数を以下のように表す。

$$V_{ij} = \sum_{m \in M} \ln(\mu \frac{D_j}{P_{\phi_{ij}}^m} + \nu y_i) \quad (2)$$

ただし、 D_j は到着都市 J の社会経済的要因を、 M は交通旅客サービス m の集合を表す。また、 μ 、 ν はパラメータである。最適経路 ϕ_{ij} での一般化費用 $p_{\phi_{ij}}^m$ は次式で与える。

$$p_{\phi_{ij}}^m = \sum_{\phi_{ij}} P_{\phi_{ij}}^m + \alpha \sum_{\phi_{ij}} (T_{\phi_{ij}}^m + \frac{E}{\min F_{\phi_{ij}}^m}) \quad (3)$$

ここに、 $\sum_{\phi_{ij}} P_{\phi_{ij}}^m$ は経路 ϕ_{ij} を構成するすべての路線における運賃の和を、 $\sum_{\phi_{ij}} T_{\phi_{ij}}^m$ は所要時間の和を表している。 $\min F_{\phi_{ij}}^m$ は運行頻度の最小値、 E は1日の長さ、 $E / \min F_{\phi_{ij}}^m$ は平均待ち時間、 α はパラメータである。

都市 ij 間の交通サービス m に対するOD需要関数(都市 ij を発着都市とする需要)は以下で与えられる。

$$X_{\phi_{ij}}^m = \frac{\mu D_j \cdot N_i}{v(P_{\phi_{ij}}^m)^2} \cdot \frac{(\mu D_j / p_{\phi_{ij}}^m + \nu y_i)^{-1}}{\sum_{m \in M} (\mu D_j / p_{\phi_{ij}}^m + \nu y_i)^{-1}} \quad (4)$$

ただし、 N_i は都市 i の人口、 μ 、 ν はパラメータである。また、都市 ij 間の交通サービス m に対するリンク需要関数(都市 ij を発着都市とするか否かに関わらず都市 ij 間を通過する需要)は以下のようになる。

$$X_{ij}^m = \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} \delta_{ijkl}^m \cdot X_{\phi_{kl}}^m \quad (5)$$

ここに、 K は都市の集合を表す。 δ_{ijkl}^m は都市 kl 間の最適経路が都市 ij を通過するか否かを表すダミー変数である。

$$\delta_{ijkl}^m = \begin{cases} 1: \text{都市 } ij \text{ 間を通過する。} \\ 0: \text{都市 } ij \text{ 間を通過しない。} \end{cases} \quad (6)$$

(4) 航空企業の行動

航空企業は運賃・機材等の変更をしないものとし、利潤を最大化する運航頻度 F_{ij}^n を選択するが、自治体が路線誘致行動を行う場合、航空企業は所与の航空ネットワークの下で自治体が要求する運行頻度 F_{ij}^n を選択する。

$$F_{ij}^n = \arg \max_{F_{ij}^n} \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} (P_{ij}^n \cdot X_{ij}^n - C_{ij}^n - C_F^n) \quad (7)$$

$$\text{s.t. } X_{ij}^n \leq F_{ij}^n \cdot S_{ij}$$

ただし、 C_{ij}^n は可変費用を、 C_F^n は固定費用を表す。

航空企業の可変費用は路線距離 L_{ij} および運航頻度 F_{ij}^n に関してコブダグラス型に類似した以下の技術を持つものと仮定する。

$$C_{ij}^n = \sigma (L_{ij})^\tau (F_{ij}^n)^{\nu_{ij}^n} \quad (8)$$

σ と τ はパラメータであり、 ν_{ij}^n は運航頻度に関する規模の経済性を考慮して以下のように定式化する。

$$\nu(F_{ij}^n) = \rho_1 \cdot (F_{ij}^n)^2 + \rho_2 F_{ij}^n + \rho_3 \quad (9)$$

ここに、 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 はパラメータである。

(5) 運航頻度と運航補助

自己や他の自治体の路線誘致行動による路線 ij 間における航空企業の余剰が減少する場合、自治体の負担する路線 ij 間の運航補助金 PS_{ij} は、

$$PS_{ij} = -(P_{ij} \cdot X_{ij} - C_{ij}), \quad (10)$$

正の場合は $PS_{ij}=0$ となる。ここに、 P_{ij} は路線 ij 間の航空運賃を、 X_{ij} は路線 ij 間を移動する需要を、 C_{ij} は路線 ij 間における便数に関する可変費用を表す。

2つの自治体が同じ経路を誘致する場合、運航補助金を配分する必要がある。配分の割合は要求する運航頻度により決定されると考える。ここに、自治体 i が希望する運航頻度を f_i 、自治体 j が希望する運航頻度を f_j とする。いま、 $f_i > f_j$ とすると、実現する運航頻度は f_i で、自治体 ij は路線誘致に伴う費用 c_i, c_j を次式のように負担するものとする。

$$c_i = PS_{ij}^n \times \frac{\max[f_i, f_j] - \frac{1}{2} \min[f_i, f_j]}{\max[f_i, f_j]} \quad (11)$$

$$c_j = PS_{ij}^n \times \frac{\frac{1}{2} \min[f_i, f_j]}{\max[f_i, f_j]} \quad (12)$$

(6) 利得

各空港のサービス圏に居住する利用者の消費者余剰 CS_i はネットワーク上の空港の集合を $K=\{I, h\}$ とすると

$$CS_i = \sum_{j \in K} \xi_{ij} \cdot \int_{p_{ij}}^{\infty} X_{ij} \cdot dp_{ij} \quad (13)$$

ただし、 p_{ij} は路線 i, j 間を利用した場合の一般化費用であり、その内訳は航空運賃、所要時間、航空旅客サービスを受ける旅客の平均待ち時間である。

ξ_{ij} は路線 i, j 間が到達可能であるか否かを表すダミー変数である。

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 1: \text{到達可能である} \\ 0: \text{到達可能でない} \end{cases} \quad (14)$$

これより自治体 i の利得 Π_i は次式となる。

$$\Pi_i = CS_i - c_i \quad (15)$$

(7) 自治体の路線誘致行動

自治体の路線誘致行動は相互依存性を考慮しナッシュ均衡に従うとする。自治体は誘致行動の繰り返しによって得られる各期の利得の和を最大化するよ

うに路線誘致行動を行う(繰り返しゲームの概念に従う)。割引因子 δ により航空輸送サービスを取り巻く環境の変化や予測の不確実性等を考慮する。自治体は各期ごとに近視眼的に行動するが、本研究で提言する誘致方策の分析方法を有する自治体(簡単化のため、ここでは1つ)のみ n 期先まで予見して行動できるものとする。複数均衡が生じる場合、予見可能な自治体は長期的な利得最大化を達成するため、長期的利得最大をもたらす経路上の均衡解と他の均衡解がもたらす利得の差額を他の自治体に支払うことにより、均衡解を選択することが出来るものとする。利得の総和 Π_r は

$$\Pi_r = \sum_{t=1}^n \Pi_t' \delta^{t-1} - Q \quad (16)$$

ただし Q は (9) 式に示す均衡解誘導費用の総和、

$$Q = \sum_{t=1}^n \zeta_t' \cdot q_t' \cdot \delta^{t-1} \quad (17)$$

であり、 ζ_t' は以下に示すダミー変数である。

$$\zeta_t' = \begin{cases} 1 & : t \text{ 期目に複数均衡解がある} \\ 0 & : t \text{ 期目に複数均衡解がない} \end{cases} \quad (18)$$

であり、 q_t' は t 期目のゲームに自治体 i が他の自治体の誘導にかかる費用を示す。

$$q_t' = \sum_{j \in I, j \neq i} \{\max[\pi_j'] - \pi_i'\} \quad (19)$$

ただし、 $\max[\pi_j']$ は t 期目のゲームで複数存在する均衡解の中での自治体 j の均衡利得の最大値を、 π_j' は自治体 i が実現したいと考える均衡解における自治体 j の均衡利得を示す。

なお、本研究では純粋戦略の範囲での均衡解のみを取り扱う。

3. シミュレーション分析

(1) 設定条件

シミュレーション分析により航空ネットワークの形成過程を分析し、予見に基づく誘致行動が自治体にとってどのような成果をもたらすかを検討する。分析対象ネットワークは4都市からなり、都市1は東京のような大都市、都市2~4は地方都市とする。鉄道企業は全都市を直結するネットワークを有し、各路線の運賃と運行頻度は一定値に固定されているものとする。運賃と所要時間については、航空・鉄道とも運賃-距離および所要時間-距離の関係式を実績値から推定して与えた。路線誘致行動ゲーム1期を1年間とし、各自治体の路線誘致行動が均衡状態に至るまで繰り返す。長期にわたる予見を行うことができる空港は空港4であり、他の3つの空港は近視眼

的に行動する。各期における運航頻度の増加分の最大値は6便とし、空港1は容量制約のため、4期に1度しか路線の見直しができないものとする。

需要関数と費用関数のパラメータは各種統計データから推計し、 $\mu=0.230, \nu=2.371, \sigma=3751.4, \tau=0.808, \rho_1=0.040, \rho_2=-0.498, \rho_3=3.020$ とした。

(2) 事例 1

想定するネットワークを図-1に、自治体が路線誘致行動を行う前の状態（航空企業の利潤最大化行動によって運航される路線）における路線と便数ならびに各空港のサービス圏の居住人口を図-2に示す。

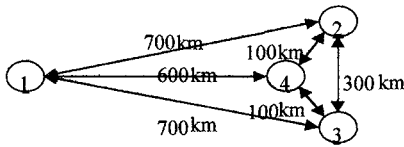


図-1 事例1における想定ネットワークの形状

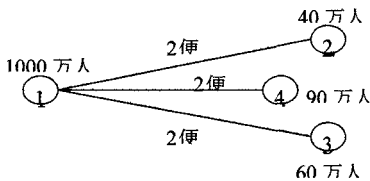
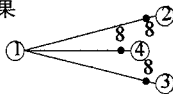


図-2 事例1における誘致行動前の路線便数

シミュレーション分析結果の一部を図-3に示す。図中の・は直近の空港が誘致した便数を表している。このケースでは、2期目の路線誘致行動において複数均衡が生起する。2期目において短期的には形成過程1をとるほうが利得は高い。しかしながら、誘致行動を繰り返した結果、長期的には形成過程2を選択するほうが利得が高いことがわかる。

1 期目の路線誘致結果



2 期目の路線誘致結果

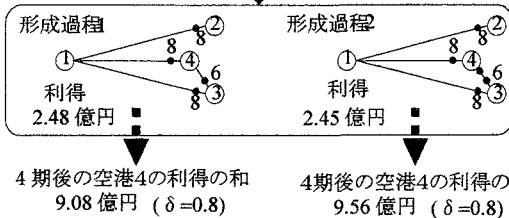


図-3 事例1におけるネットワークの形成過程

(3) 事例 2

ネットワークの形成過程は地方空港のサービス圏人口によっても異なる。図-4のネットワークで都市1～4の人口(万人)としてCase1 {1000, 30, 60, 60}とCase2 {1000, 30, 40, 100}の2つを検討した。いずれも6期で路線誘致行動は均衡状態に達したが、Case2では形成過程3の均衡時の便数が都市1-2, 1-3, 1-4間でそれぞれ14便に、都市3-4間で12便となり、Case1とは異なる結果となった。他にも同様の状況が多数得られており、サービス圏人口の違いによりネットワークの形成過程は比較的敏感に変化すると考えるべきであろう。紙幅の都合上図示を割愛するが、Case2では形成過程1と形成過程3の結果は同一であるものの利得の和は形成過程3の方が大きいとの結果が得られている。誘致路線を適切に選定することによりサービス水準を高めうること、ならびに、均衡解誘導を行うことによる形成過程の選択が重要な役割を果たすことを示唆するものといえる。

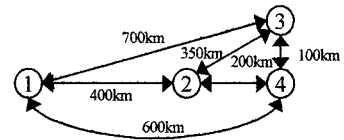


図-4 事例2の想定ネットワーク

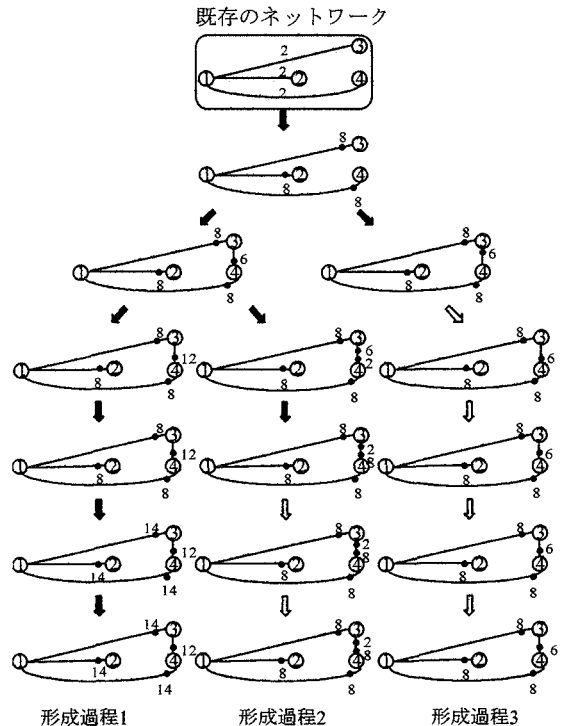


図-5 事例2のネットワーク形成過程 (Case1)

(4) 事例3

路線誘致行動の結果は、他の地方空港との位置関係や主要空港との距離によっても影響を受ける。図-6に例示するネットワークでは、地方空港間の距離は等しいが主要空港と地方空港の距離のみが異なっている。図-7に推計されたネットワーク形成過程を示す。他のケースの推計結果とも合わせてみると、主要空港との路線距離が短くなるほど直行路線を有することの利便性が高く、長くなるほど他の空港を介して間接的に接続すること、すなわち地域ハブ化のメリットが生じることがわかる。その場合、拠点空港としての優位性は、空港相互の位置関係やサービス圏域人口により多様な状況が存在し、ネットワークの形成過程は各空港の路線誘致戦略に大きく支配されるものと推察される。

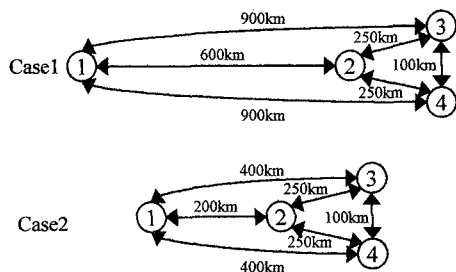


図-6 事例3の想定ネットワーク

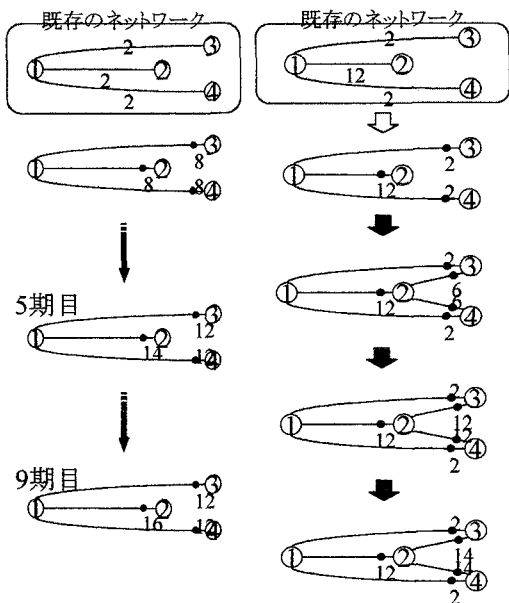


図-7 事例3のネットワーク形成過程

(5) 事例4

本事例では、主要空港の容量不足が地方空港の路線誘致行動にどのような影響を与えるのかを分析する。中心に主要空港があり、その周りを地方空港が取り囲むようなネットワークを想定する(図-8)。自治体が路線誘致行動を行う前の、航空企業の利潤最大化行動による路線と当初便数ならびに各空港のサービス圏域の人口は図-9に示すとおりである。

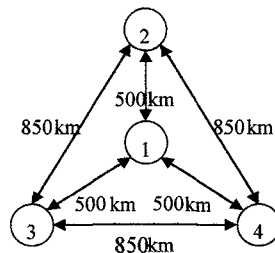


図-8 事例4における想定ネットワークの形状

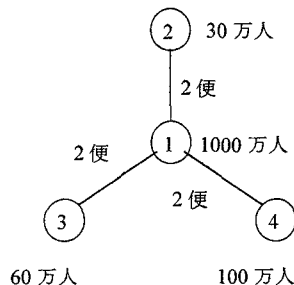
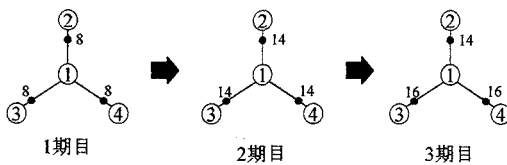


図-9 事例4における路線誘致行動前の路線便数

推定されたネットワークの形成過程を図-10に示す。設定した条件の下では、誘致行動のどの期においても複数均衡は発生しなかった。主要空港の容量に制限を設け場合には、3期間でネットワークに変化が見られなくなったが、主要空港の容量に制限を設けた場合、空港1との路線誘致ができない期には地方空港間での路線誘致行動は行われず、航空路線の形状・便数には変化が見られなかった。そして、空港1への路線誘致行動が可能となる期のみネットワークに変化があった。最終的にはネットワークの形状は同じ形になったが、主要空港の容量に制限がある場合は、制限のない場合よりも3倍の期間を費やす結果となった。これにより、主要空港の容量不足は、積極的な路線誘致行動を行う自治体にとって大きな障害であることが分かる。

空港容量に制限がない場合



空港容量に制限がある場合

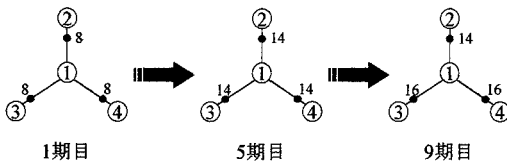


図-10 事例4におけるネットワークの形成過程

4. おわりに

本研究では、利用者と航空企業の需要供給均衡モデルを組み込んだ繰り返し n 人非協力ゲームを用いて地方自治体の路線誘致行動の分析を行った。多くの単純化を含んだ限定的な分析ではあるが、検討した範囲内では以下のような知見が得られた。

①長期的なネットワーク形成過程の的確な予測と評価に基づく戦略的な路線選択行動が、地方空港が多数の路線を

保有し充実した航空旅客サービスを提供するために有効である。②近視眼的な状況判断は長期的に最適なネットワーク形成経路に戻れなくなる状況に陥る可能性がある。③主要空港の容量不足は、ネットワークの形成基幹を長期化させ、サービス水準向上の支障となるため、容量拡大を図ることは地方空港活性化の観点からも望ましい。④将来を予測する場合に重要な役割を果たす複数均衡下の均衡解選択とそれへの誘導は、長期的な観点に立った空港連携の必要性を示唆するものと考えられる。

なお、本研究を進めるにあたり東北大学大学院情報科学研究科の福山敬助教授との議論が有益であった。記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 例えば, Hendricks, K., M. Piccione and G. Tan: Equilibria in Networks, *Econometrica*, Vol.67, No.6, pp.1407-1434, 1999.
- 2) 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, pp.133-144, 1996
- 3) 喜多秀行・坂田裕彦・吉村晋: 運航補助による地域航空旅客サービスの改善可能性に関するモデル分析, *土木計画学研究・論文集*, No.16, pp.195-200, 1999.
- 4) 喜多秀行・坂田裕彦・谷本圭志: 路線バス型フライトの導入による航空路線の維持・開設可能性に関する分析, *土木計画学研究・論文集*, No.17, pp.67-74, 2000.

航空ネットワークの形成に及ぼすエアポートセールスの効果に関するモデル分析

喜多秀行, 坂田裕彦, 谷本圭志

各自治体の路線誘致行動はネットワークの外部性を介して他の自治体にも影響を及ぼし、相互依存的な競争状態を形成されている。また、現在の路線誘致行動が将来の行動選択の範囲を限定するという経路依存性が存在するため、短期的に高い航空旅客サービス水準をもたらす路線誘致行動が、長期的にも高いサービス水準をもたらすとは限らない。本研究は、自治体の路線誘致行動におけるネットワーク形成過程を n 人非協力ゲームの繰り返しと見なして分析し、効果的な路線誘致行動を見出すためのひとつの方法論を提案したもので、地方空港がおかれている諸条件や主要空港の容量制約などとするべき戦略との関係に関するいくつかの有用な知見が得られた。

Airport Sales and its Influence on the Formation of Local Aviation Network: A Model Analysis

By Hideyuki Kita, Hirohiko Sakata and Keishi Tanimoto

Local governments are eager to raise the level of aviation services. Strategic airport sales are essential to realize a rich flight network with frequent services to other airports. However, the market is highly competitive and finding an effective strategy is not so easy because their actions are interdependent due to network externality. This study models this situation as an n -person non-cooperative repeated game. Some useful findings can be obtained through numerical examples.