

旅客と航空会社の行動を考慮した空港間競争モデル

Inter-airport competition model considering passenger and airline behavior

北海道大学工学部 ○学生員 勝田隆成 (Ryuusei Katsuta)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 峪 龍一 (Ryuichi Tani)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

1. はじめに

国土交通省航空局によると、航空は経済産業活動や国民生活を支える基盤であり、国内外の交流の活性化には不可欠である。日本の航空産業が発展することは、我が国の産業や都市の国際競争力の強化、訪日外国人観光客の増加、そして日本全国の地域活性化に貢献できる。アジア圏においては、航空需要の伸びは今後も堅調になると予測されている¹⁾。一方で、日本の人口は減少傾向にあり、国内経済の規模縮小によって国内の航空需要が減少する可能性がある。こうした状況に対応するには、拠点空港であるハブ空港での国際線の乗り継ぎ需要を取り込む必要があり、アジア圏におけるハブ空港としての地位確立が求められている。国内において、成田国際空港は代表的なハブ空港の一つであり、成田国際空港株式会社によると、全利用者の約2割が国際線の乗り継ぎを行っている²⁾。しかし、これまでの研究では、ハブ空港での航空機の乗り継ぎを考慮しているものは少ない。空港運営会社の利益の観点から、正確な利用者行動を考慮することは、便数や利用者数の増加につながる可能性がある。結果として、空港に携わる従業員の雇用を創出したり、ハブ空港としての国際的な地位を確立したりするなどの効果が考えられる。

空港の競争市場を扱う研究として、竹林ら³⁾は、国際航空旅客輸送市場の構造分析を行い、航空会社と旅客から構成される完全競争市場をモデル化している。このモデルでは構成されるモデルに空港運営会社が含まれておらず、乗り継ぎについても考慮されていない。Tani et al.⁴⁾は、空港の一括民営化による航空市場の変化を、旅客と空港事業者と航空会社から構成される市場をモデル化し旅客の行動を分析している。しかし、このモデルは空港運営会社をモデルに含むが、協力市場をモデル化しており、競争市場モデルではない。

そこで本研究では、航空会社の利潤最大化行動および乗り継ぎ行動を含んだ旅客の航空会社と航空便の選択行動を考慮し、空港運営会社が利潤を最大化するような空港間の競争を表現するモデルを提案する。

2. モデルの概要

以降、リンクは航空会社ごとの路線を指し、1本以上のリンクから構成されるパスは旅客の利用する経路を指すものとする。

例えば、図-1において、出発空港 $r = r_1$ から、到着空港 $s = s_1$ まで向かう場合、リンク $i_{1,A}$ と $i_{2,A}$ を通るパス、 $i_{1,B}$ と $i_{2,B}$ を通るパスと、 $i_{3,A}$ と $i_{4,A}$ を通るパスが挙げられ

る。

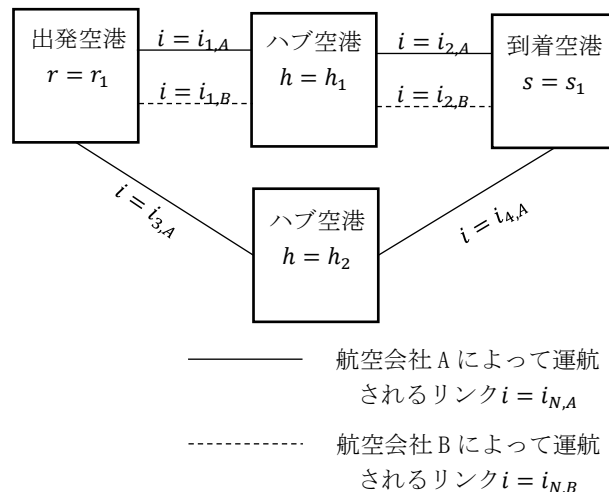


図-1 航空ネットワークモデル図の例

本研究で提案するモデルではステークホルダーとして旅客、航空会社、空港運営会社の三者を想定する。また、三者に対してそれぞれ以下の仮定を適用する。

- 旅客には二区間搭乗する（ハブ空港で乗り継ぎをする）旅客と一区間のみ搭乗する旅客がいるものとする。
- 出発空港と到着空港の間には直行便がなく、二区間搭乗する旅客は自らの効用を最大化するようにパスを選択する。
- 二区間搭乗する旅客が選択する航空会社は、トリップを通して変更することはできないものとする。例えば図-1において、リンク $i_{1,A}$ と $i_{2,B}$ を通るパスは存在しないものとする。
- 一区間のみ搭乗する旅客は自らの効用を最大化するようにパスを選択する。例えば図-1において、出発空港 $r = r_1$ からハブ空港 $h = h_1$ までの移動を行う旅客も考慮する。
- 航空会社は自らの利潤を最大化するように各リンクにおける航空便の運航頻度と運賃を決定する。
- ハブ空港を持つ空港運営会社の利潤最大化問題のみを考慮する。したがって、本モデルではハブ空港の着陸料のみが未知変数となる。
- ハブ空港1つにつき1つの空港運営会社が存在し、個別に運営を行うものと仮定する。

図-2は、モデル内の三者の関係を示す。各ステークホ

ルダの行動は相互に影響し合い、旅客と航空会社の間には、旅客が航空便を運航する航空会社に運賃を支払う関係が存在する。航空会社と空港運営会社の間には、空港運営会社は着陸料を決定し、それに応じて航空会社が航空便の運航頻度と運賃を決定する関係が存在する。航空会社は航空機を着陸させる度に空港運営会社に対して着陸料を支払う。

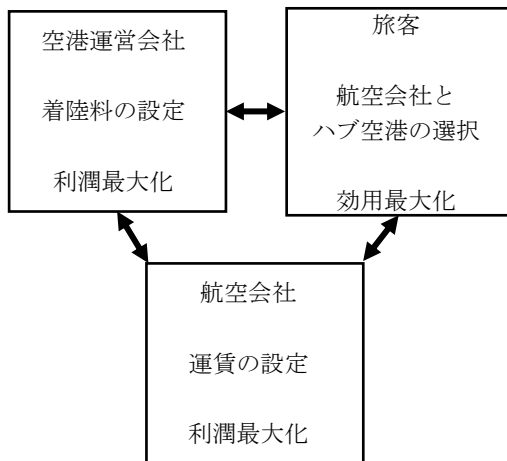


図-2 モデル内の三者の関係図

そのため、航空会社が十分な需要が見込まれるリンクにおいて航空便の運航頻度の増加させることで、空港運営会社は着陸料による収入が増加し、利潤が増える関係が存在する。また、空港運営会社が着陸料を値下げすると、航空会社は運賃を値下げでき、結果として乗り継ぎ先としてその空港が選ばれやすくなることを表現できる。

本研究で提案するモデルでは、初期値として各リンクにおける航空便の運航頻度や運賃、着陸料を設定し、以下のサイクルで計算を行う。

- 手順1. 旅客がパスを選択し、選択した航空会社に対して運賃を支払う。
- 手順2. 航空会社は着陸料を空港運営会社に支払う。
- 手順3. 空港運営会社は得た利潤をもとに、着陸料の変更を行う。
- 手順4. 着陸料の変化に伴って航空会社が各リンクにおける航空便の運航頻度や就航の可否、運賃を変化させる。

以上を1サイクルとする計算を繰り返し、空港運営会社の利潤の計算を行う。また、本研究ではいずれのサイクルにおいても手順3において空港運営会社は着陸料の変更を行うこととする。さらに、複数の需要変化シナリオを設定し、そのそれぞれにおいて着陸料と運賃を最適化する。

3. モデルの定式化

モデルを定式化するにあたって、旅客のパスの選択や航空会社と空港運営会社の利潤最大化について定式化を行う。それぞれの定式化は Tani et al.⁴⁾で行われており、本研究はそれをもとにする。

3.1 記号

本稿で用いる主な記号は以下に示す通りである。

I	リンク i の集合
N	航空会社 n の集合
H	ハブ空港運営会社 h の集合
K	機材の種類 k の集合
Ω	ODペアの集合
r	出発空港(出発ノード)
s	到着空港(到着ノード)
J_{rs}	ODペア $rs \in \Omega$ のパス j の集合
$u_{j,n}^{rs}$	旅客が出発空港 r から到着空港 s まで移動するとき航空会社 $n \in N$ が運航するパス $j \in J_{rs}$ を利用するときの効用
t_i	リンク $i \in I$ の所定の飛行時間
t_h	ハブ空港 $h \in H$ における最小乗り継ぎ時間
λ	$0 < \lambda < 1$ の値をとるパラメータ
C_h	ハブ空港 $h \in H$ の空港容量
w_k	機材 $k \in K$ の座席数
t_{ho}	ハブ空港 $h \in H$ においてほかの航空機がないときの出発から離陸まで、または着陸から到着までにかかる時間
t_{bo}	ハブ空港 $h \in H$ において乗客がないときの搭乗開始から出発まで、または到着から降機が終了するまでにかかる時間
$p_{j,n}^{rs}$	旅客が出発空港 r から到着空港 s までの移動に航空会社 $n \in N$ が運航するパス $j \in J_{rs}$ を選択する確率
$f_{j,n}^{rs}$	旅客が出発空港 r から到着空港 s まで航空会社 $n \in N$ が運航するパス $j \in J_{rs}$ を利用したときの運賃
$\mu_{i,n}^k$	航空会社 $n \in N$ が設定したリンク $i \in I$ の機材の大きさ $k \in K$ によって運航される運航頻度
δ_i^j	パス $j \in J_{rs}$ にリンク $i \in I$ を含む場合には1、そうでない場合は0になる変数
δ_h^j	パス $j \in J_{rs}$ にハブ空港 $h \in H$ を含む場合には1、そうでない場合は0になる変数
$\delta_{i,n}$	航空会社 $n \in N$ がリンク $i \in I$ を運航している場合は1、そうでない場合は0になる変数
$\delta_{i,n}^h$	航空会社 $n \in N$ がリンク $i \in I$ をハブ空港 $h \in H$ に就航させている場合は1、そうでない場合は0になる変数
π_h	ハブ空港運営会社 $h \in H$ の利潤
π_n	航空会社 $n \in N$ の利潤
q_{rs}	出発空港 r と到着空港 s との間の需要
$q_{j,n}^{rs}$	出発空港 r から到着空港 s まで移動するとき航空会社 $n \in N$ が運航するパス $j \in J_{rs}$ を利用するときの旅客数
$q_{i,n}$	航空会社 $n \in N$ が運航するリンク $i \in I$ の旅客数
c_h	空港運営会社 $h \in H$ の運営コスト

- c_n 航空会社 $n \in N$ の運営コスト
 r_h ハブ空港運営会社 $h \in H$ における非航空系事業の収入
 l_h ハブ空港 $h \in H$ に航空機が着陸するために必要な着陸料
 θ_n^h ハブ空港 $h \in H$ の混雑度によって発生する航空会社 $n \in N$ の追加コスト
 $\alpha, \gamma, \eta, \nu$ パラメータ

3.2 ハブ空港運営会社の利潤最大化問題

ハブ空港運営会社の利潤最大化を解くにあたり、以下のことを仮定する。

- 空港運営会社は非航空系事業による収入と着陸料から収入を得ていると仮定する。
- 非航空系事業の収入と運営コストは定数項として外生的に与えられると仮定する。
- 着陸料は空港運営会社が自らの利潤を最大化するために自由に決定することができ、機材の大きさによって個別の着陸料を設定できると仮定する。

以上の仮定に基づき、着陸料の決定問題を空港運営会社の利潤最大化問題として定式化することができ、次のように表される。

$$\max \pi_h(l_h) = r_h + \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} \delta_{i,n} \cdot \mu_{i,n}^k \cdot l_i^k - c_h \quad \forall h \in H \quad (1)$$

where

$$l_h = (l_1, \dots, l_k, \dots, l_{|K|}) \quad \forall h \in H, k \in K \quad (2)$$

$$l_k = (l_{k,1}, \dots, l_{k,i}, \dots, l_{k,|I|}) \quad \forall k \in K, i \in I \quad (3)$$

ハブ空港運営会社 $h \in H$ の収入は、非航空系事業の収入と航空会社からの着陸料収入の合計によって与えられる。ハブ空港運営会社 $h \in H$ のコストは、運営コストとして与えられる。

3.3 航空会社の利潤最大化問題

本研究では、航空会社は自社の利潤を最大化するようにリンクにおける航空便の運航頻度 $\mu_{z,n}^k$ とパスの運賃 $f_{j,n}^{rs}$ を決定する。航空便の座席数は与件の定数とする。着陸料はハブ空港運営会社の利潤最大化問題によって決められるが、航空会社の利潤最大化問題においては、所与の定数として表される。また、運賃に関しては、航空会社が自社の利潤を最大化するために着陸料や需要によって自由に決定できると仮定する。この仮定から運賃の決定問題を航空会社の利潤最大化問題として定式化することができる。航空会社 $n \in N$ のリンクにおける運航頻度に関する利潤最大化問題は次のように表される。

$$\max \pi_n(f_{j,n}^{rs}) = \sum_{j \in J_{rs}} f_{j,n}^{rs} \cdot q_{j,n}^{rs} - c_n(\mu_i^n) \quad \forall n \in N, rs \in \Omega \quad (4)$$

where

$$c_n(\mu_i^n) = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \mu_{i,n}^k \cdot l_{i,n}^k + \theta_n^h(\mu_i^n) \quad \forall n \in I, h \in H \quad (5)$$

$$\theta_n^h(\mu_i^n) = \sum_{i \in I} \eta_1 \cdot \delta_i^n \cdot \exp\left(\eta_2 \cdot \frac{\sum_{z \in I} \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} \mu_{z,n}^k}{C_h}\right) \quad \forall h \in H \quad (6)$$

$$f_{j,n}^{rs} = (f_{1,n}^{rs}, \dots, f_{j,n}^{rs}, \dots, f_{|J_{rs}|,n}^{rs}) \quad (7)$$

$$\mu_i^n = (\mu_1^n, \dots, \mu_i^n, \dots, \mu_{|I|}^n) \quad \forall i \in I, n \in N \quad (8)$$

航空会社 $n \in N$ の収入は運賃と旅客数によって与えられる。航空会社 $n \in N$ のコストは、リンクにおける運航頻度に基づいた着陸料と空港の混雑によって生じる追加コストの合計として与えられる。航空会社はリンクにおける運航頻度と運賃のみを決定し、機材の大きさは外生的に与えられるものとする。

ここで $\theta_n^h(\mu)$ は、ハブ空港における着陸待ちなどのハブ空港 $h \in H$ の混雑に起因するエアライン $n \in N$ の追加的費用を表し、竹林ら³⁾をもとにしている。

3.4 旅客の航空会社とパスの選択行動

本研究では、旅客のパスの選択行動について以下のように仮定する。

- 旅客のパスの選択行動はロジットモデルで表現されているものとする。
- 航空券は出発空港から到着空港まで一括で購入できるものし、運賃は1トリップの合計の運賃で表されるものとする。
- ハブ空港では乗り継ぎのみを行い、手荷物の預けなおしやチェックインなどの不効用は考慮しない。

以上の仮定に基づき、旅客が出発空港 r から到着空港 s までの移動に航空会社 $n \in N$ が運航するパス $j \in J_{rs}$ を利用するときの効用 $u_{j,n}^{rs}$ を式(9)で定義する。

$$u_{j,n}^{rs} = \alpha_1 \cdot f_{j,n}^{rs} + \alpha_2 \left\{ \sum_{i \in I} \delta_i^j \cdot t_i + \sum_{h \in H} \delta_h^j (d_{hx}(\mu_i^n) + d_{hb}(\mu_i^n)) \right\} + \sum_{h \in H} \delta_h^j \cdot \alpha_3 \left(t_h + \sum_{i \in I} \delta_i^j \cdot \frac{1}{\mu_i^n} \right) + \sum_{h \in H} \delta_h^j \cdot \alpha_4 \cdot h \quad \forall n \in N, i \in I, rs \in \Omega \quad (9)$$

where

$$d_{hx}(\mu_i^n) = t_{h0} \cdot \gamma_1 \left(\frac{\sum_{i \in I} \sum_{n \in N} \delta_{i,n}^h \cdot \mu_{i,n}^k}{C_h} \right)^{\gamma_2} \quad \forall h \in H \quad (10)$$

$$d_{hb}(\mu_i^n) = t_{b0} \cdot \nu_1 \left(\frac{q_{i,n}/\mu_{i,n}}{\sum_{i \in I} \delta_i^k \cdot w_k} \right)^{\nu_2} \quad \forall h \in H \quad (11)$$

$$q_{i,n} = \sum_{j \in J_{rs}} \delta_i^j \cdot q_{j,n}^{rs} \quad \forall n \in N, i \in I, rs \in \Omega \quad (12)$$

ここで式(9)の各項は、運賃、飛行時間、乗り継ぎ時間、各空港に固有の定数を表す。 $d_{hx}(\mu)$ は、ハブ空港での混雑によって飛行機が出発してから離陸するまで、または飛行が着陸してから駐機場に入るまでに発生する遅延時間を表している。滑走路容量と空港を発着する便数の需

給に基づく混雑によって遅延時間が与えられる。 $d_{hb}(\boldsymbol{\mu})$ は、機内での混雑によって旅客の搭乗や降機の際に発生する遅延時間を表している。機材の座席数と実際に搭乗する旅客数の間の需給に基づく混雑によって遅延時間が与えられる。 $\alpha_{4,h}$ はハブ空港 $h \in H$ に固有の定数である。式(12)は、リンクを移動する旅客数を示し、該当するリンクを含むパスの旅客数の合計を表す。

また、旅客の効用に、一般化極地分布に従う認知誤差 $\boldsymbol{\varepsilon}_n = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{|N|})$ を加えることで、ランダム効用理論に基づいて、航空会社 $n \in N$ が運航するパス $j \in J_{rs}$ の選択確率が与えられる。誤差分布の確率密度関数は次のように示される。

$$f(\boldsymbol{\varepsilon}_n) = \exp\left(-\sum_{h \in H} \left(\sum_{n \in N} \exp\left(-\frac{\varepsilon_n}{\lambda}\right)^\lambda\right)\right) \quad (13)$$

ここで λ は、 $0 < \lambda < 1$ を満たすパラメータである。旅客が出発空港 r から到着空港 s まで航空会社 $n \in N$ が運航するパス $j \in J_{rs}$ を選択する確率 $p_{j,n}^{rs}$ は次のように表される。

$$p_{j,n}^{rs} = \frac{\exp(u_{j,n}^{rs}/\lambda)}{\sum_{j \in J_{rs}} \exp(u_{j,n}^{rs}/\lambda)} \quad \forall n \in N, rs \in \Omega \quad (14)$$

よって、出発空港 r から到着空港 s まで移動するとき航空会社 $n \in N$ が運航するパス $j \in J_{rs}$ の旅客数 $q_{j,n}^{rs}$ は、次のように表される。

$$q_{j,n}^{rs} = q_{rs} \cdot p_{j,n}^{rs} \quad \forall n \in N, j \in J_{rs}, rs \in \Omega \quad (15)$$

ここで q_{rs} は、外生的に与えられる出発空港 r と到着空港 s との間の需要である。

4. 数値計算

数値計算については3章で定式化したモデルについて複数のOD需要を設定して計算を行う。まず、運賃、着陸料、需要の初期値を設定し、2章で述べたサイクルに従って計算を行う。

5. まとめと今後の課題

本研究では、航空会社の利潤最大化行動および乗り継ぎの行動を含んだ旅客の航空会社と航空便の選択行動を考慮しつつ、空港運営会社が利潤を最大化するような空港間の競争を表現するモデルを提案した。数値計算の結果については講演時に報告する。

今後の課題としては、同一国内にあるハブ空港運営会社が協力関係にある状態で空港を運営した場合の定式化や、乗り継ぎを行う空港で滞在を行うストップオーバーを考慮した旅客の効用の定式化を行うことなどが挙げられる。

参考文献

- 1)国土交通省 航空局：航空を取り巻く状況と今後の課題
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001330402.pdf>
(閲覧日 2022.11.28)
- 2)成田国際空港株式会社：空港運用状況(2022年)
https://www.naa.jp/jp/airport/pdf/unity/y_20221124.pdf
(閲覧日 2022.11.29)
- 3) 竹林幹雄, 黒田勝彦, 鈴木秀彦, & 宮内敏昌. (2001). 完全競争市場として見た国際航空旅客輸送市場のモデル分析. 土木学会論文集, (674), 35-48.
- 4) Tani, R., Takashima, I., Kato, T., Tamura, T., & Uchida, K. (2022). Analysis of the effect of bundled airport privatization on an airline network. *Transport Policy*, 124, 203-21