旅客と航空会社の行動を考慮した空港間競争モデル

勝田　隆成[1]・峪　龍一[2]・内田　賢悦[3]

[1] 学生会員　北海道大学大学院修士課程　工学院北方圏環境政策工学専攻
（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail: ryuseikatsuta-1026@eis.hokudai.ac.jp

[2] 正会員　北海道大学大学院助教授　工学研究院（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail: r-tani@eng.hokudai.ac.jp

[3] 正会員　北海道大学大学院教授　工学研究院（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

本研究は，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，競争関係にある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構築を目指している．本稿では，空港運営会社の利潤最大化問題における着陸料を所与として，航空会社の利潤最大化問題と旅客の効用最大化問題に焦点を当てて議論する．ネットワーク内における経路ベースでの運賃を設定することで乗り継ぎ運賃を考慮する．また，航空会社の利潤を最大化するような運航本数や運賃が存在することを確認した．数値計算において，航空会社の運賃と運航本数を同時に解いている．

Key Words: *airline network, hub-airport, landing fee, passenger behavior, optimization problem*

1.　はじめに

(1)　背景

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なインフラである．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)]．アジア圏の堅調な需要の影響を享受するためには，我が国のハブ空港が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る．成田国際空港株式会社によると，全利用者の約 2 割が国際線での乗り継ぎを行っている．[2)] 乗り継ぎ行動は空港利用において無視できない割合を占めており，旅客の乗り継ぎ行動とその背後にある問題を明示的に扱った航空ネットワークの分析モデルが必要である．

一般的に，長距離輸送を担う公共交通機関で乗り継ぐ場合，乗り継ぐ前後の便の運賃を別々に支払う場合と通しの運賃として支払う場合では後者の方が安くなる．つまり，乗り継ぎ時の運賃計算においては単純な加法性は成立しない．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に着目した研究はあるが（Oh et al. (2022)[3)] など），複数の航空便を乗り継ぐ場合は，それぞれの航空便の運賃を合算して運賃計算の加法性を仮定したり，乗り継ぎに伴う外生的な割引率を設定して運賃計算の部分的な非加法性を仮定したりして，運賃を表現するものが多い．部分的な非加法性を仮定する場合，通しの運賃は乗り継ぎの前後の便の運賃と乗り継ぎ運賃を決定するモデルに依存するため，乗り継ぎ運賃を決めるための自由度は小さい．一方で，乗り継ぎを考慮した通しの運賃を，乗り継ぎ前後の各航空便の運賃とは独立なものとして決めるモデルは著者らの知る限り少ない．

(2)　既往研究

空港間の競争市場の把握は重要な問題の一つであり，多くの研究がなされてきた．空港間の競争市場と旅客の行動を考慮したモデルの構築は，Zhang et al.(1997)[4)]，Tae et al.(1996)[5)]などによって行われてきた．竹林ら(2001)[6)]は，

自由化された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として実用計算可能な手法を用いたモデル化を行っている．旅客需要が弾性的に変化する需要変動型のもとで需要予測を行い，空港容量拡張の影響を検討している．このモデルにおいて，運賃は所与の値として与えられており，航空会社の行動における運航本数を決定する最適化問題として定式化されている．Gong et al. (2023)[7] は，異なる市場構造における空港拡張への航空会社の対応や，空港容量拡張が深刻な混雑遅延を導くというパラドックスを起こす条件や，空港拡張が旅客の需要や社会厚生に与える影響を検証するために，空港運営会社，航空会社，旅客の 3 つのステークホルダーからなる tri-level のモデルを定式化し，異なるステークホルダー間の相互作用について調べた．Tani et al. (2022)[8] は，空港の一括民営化による航空市場の変化を検証するために，旅客と空港事業者と航空会社の 3 者から構成される市場をモデル化し，旅客の行動変化と空港事業者と航空会社の利潤を分析している．本研究では，空港間の協力関係に重点が置かれている Tani et al. (2022)[8] で用いたモデルの枠組みを採用するが空港ごとの利潤最大化行動を考慮することで，空港間の競争市場を表現できるモデルを構築する．

(3) 本研究の位置づけと目的

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，競争関係にある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構築を目指す．本稿では，空港運営会社の利潤最大化問題における着陸料を所与として航空会社の利潤最大化問題と旅客の効用最大化問題に焦点を当て議論する．

はじめに，Tani et al. (2022)[8]と同様に旅客の行動の定式化と空港運営会社と航空会社の利潤をモデル化する．そして，テストネットワークにおいて定式化された最適化問題を解き，複数の条件の計算結果を比較し，考察する．

2. モデルの概要

本研究で提案するモデルは，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が存在する Tri-level モデルである．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．
- 全ての旅客は自らの効用を最大化するように経路を選択する．

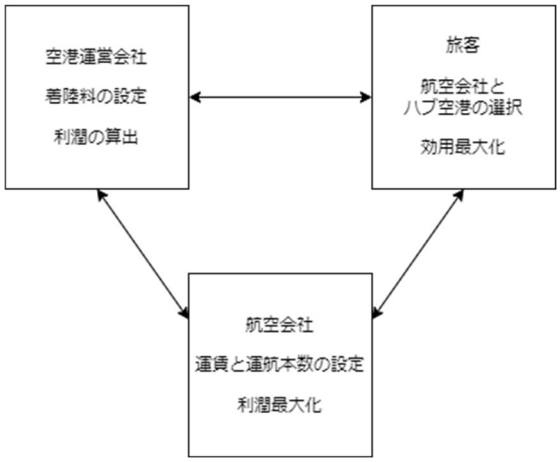


図-1 本モデルにおける三者の相互関係図

- 二区間搭乗する旅客は，トリップを通して同一航空会社を選択する．
- 航空会社は自らの利潤を最大化するように各リンクの運航本数と経路ごとの運賃を決定する．
- ハブ空港 1 つにつき 1 つの空港運営会社が存在し，独立して運営を行う．
- 本稿における乗り継ぎ運賃とは，出発地から経由地を経て到着地までの通しの経路を一括で購入することができる独立した運賃である．

航空会社は，複数の航空便を乗り継ぐ場合はそれぞれの航空便の運賃を合算したり外生的な割引率を設定したりして旅客に運賃を課しているが，本稿では上記のように仮定している．**図-1** は，モデル内の三者の関係を示す．各ステークホルダーの行動は相互に影響しあう．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，空港運営会社が決定する着陸料に応じて航空会社が航空便の運航本数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．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本数を増加させることで，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という関係が存在する．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，結果として経由地としてその空港が旅客に選ばれやすくなることを表現できる．

3. 提案モデル

本章では，提案するモデルの定式化について説明する．

(1) 記号の定義

本研究で用いる数式記号は以下のとおりである.

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
r	出発空港（出発空港ノード）
s	到着空港（到着空港ノード）
Ω	OD ペアrsの集合
J_{rs}	OD ペア$rs \in \Omega$の経路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$n \in N$が運航する経路$j \in J_{rs}$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
t_{b0}	旅客がいないときの搭乗や降機にかかる時間
d_{hb}	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
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
$p_{j,n}^{rs}$	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$n \in N$が運航する経路$j \in J_{rs}$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$n \in N$が運航する経路$j \in J_{rs}$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本数
μ_{i}^{n}	航空会社$n \in N$が設定したリンク$i \in I$で運航される運航本数
δ_i^j	経路$j \in J_{rs}$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	経路$j \in J_{rs}$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
δ_i^k	リンク$i \in I$において機材$k \in K$を含む場合には 1，そうでない場合には 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$n \in N$が運航する経路$j \in J_{rs}$を利用するときの旅客数
$x_{i,n}$	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
$l_{h,i}$	ハブ空港$h \in H$にリンク$i \in I$を運航した際に支払う着陸料
$l_{i,n}^{k}$	航空会社$n \in N$がリンク$i \in I$を機材$k \in K$で運航した際に支払う着陸料
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
ε_n	認知誤差
$\alpha_a, \gamma, \eta, \nu, \lambda$	パラメータ$(a \in \{1,2,3,4,5\})$

(2) 本モデルの計算手順

モデルを定式化するにあたって，まず，旅客の経路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する．それぞれの定式化は Tani et al.(2022)[8]で行われており，本研究はそれを援用する．

本研究で提案するモデルでは，初期値として航空会社の各リンクにおける航空便の運航本数や各経路の運賃，各空港の着陸料を設定し，以下のサイクルで計算を行う．

手順1.　下位の旅客の効用最大化問題を解く．
手順2.　中位の航空会社の利潤最大化問題を解く．
手順3.　上位の空港運営会社の利潤最大化問題を解く．

以上を 1 サイクルとする計算を繰り返し，均衡状態になるまで計算を行う．さらに，複数の着陸料変化のシナリオを設定し，そのそれぞれのシナリオにおいて運賃と運航本数を最適化する．本稿では，手順 2 までを対象として運賃と運航本数を最適化し，着陸料は外生的に与えて空港運営会社の利潤を算出する．

(3) ハブ空港運営会社の行動

ハブ空港運営会社の利潤を表現するにあたり，以下を仮定する．

- 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．
- 空港運営会社は，空港運営に必要なコストを支払っている．
- 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．

以上の仮定に基づき，空港運営会社の利潤は次のように定式化できる．

$$\max \pi_h(\boldsymbol{l}_h) = \sum_{i\in I}\sum_{n\in N} \delta_{i,n}\cdot \mu_{i,n}^k \cdot l_{h,i} + r_h - c_h \quad \forall h \in H \tag{1}$$

where

$$\boldsymbol{l} = \left(l_{1,1}, \cdots, l_{h,i}, \cdots, l_{|H|,|I|}\right) \quad \forall h \in H \tag{2}$$

ハブ空港運営会社$h \in H$の収入は，航空会社からの着陸料収入と非航空系事業の収入を合計した値である．なお, ハブ空港運営会社$h \in H$の費用項は, 運営コストとして与えられる．

(4) 航空会社の行動

航空会社の利潤を表現するにあたり，以下を仮定する．

- 航空会社は，旅客からの運賃で収入を得ている．
- 航空会社の収入は運賃と旅客数によって与えられる．
- 航空会社のコストは, 各リンクの運航本数と着陸料の積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．
- 運賃に関して, 航空会社は自社の利潤を最大化するように，着陸料と需要に応じて，運賃を自由に決定できることができる．
- 航空会社はリンクにおける運航本数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．

以上の仮定に基づき，航空会社の利潤最大化問題は次のように表される．

$$\max \pi_n(\boldsymbol{f}, \boldsymbol{\mu}) = \sum_{j\in J_{rs}} f_{j,n}^{rs}\cdot q_{j,n}^{rs} - c_n(\boldsymbol{\mu}) \quad \forall n \in N \tag{3}$$

where

$$c_n(\boldsymbol{\mu}) = \sum_{i\in I}\sum_{k\in K} \mu_{i,n}^k \cdot l_{i,n}^k + \theta_n^h(\boldsymbol{\mu}) \quad \forall n \in I \tag{4}$$

$$\theta_n^h(\boldsymbol{\mu}) = \sum_{i\in I} \eta_1 \cdot \delta_i^n \cdot \exp\left(\eta_2 \cdot \frac{\sum_{z\in I}\sum_{n\in N}\sum_{k\in K}\mu_{z,n}^k}{C_h}\right) \quad \forall n \in N \tag{5}$$

$$\boldsymbol{f} = \left(f_{1,n}^{rs}, \cdots, f_{j,n}^{rs}, \cdots, f_{|J_{rs}|,n}^{rs}\right) \quad \forall rs \in \Omega, j \in J_{rs}, n \in N \tag{6}$$

$$\boldsymbol{\mu} = \left(\mu_1^n, \cdots, \mu_i^n, \cdots, \mu_{|I|}^n\right) \quad \forall i \in I, n \in N \tag{7}$$

ここで$\theta_n^h(\boldsymbol{\mu})$は，ハブ空港における着陸待ちなどのハブ空港$h \in H$の混雑に起因する航空会社$n \in N$が負担する追加コストを表し，竹林ら (2001) [6]をもとにしたものである．

本研究では，航空会社の利潤最大化問題において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本数$\mu_{z,n}^k$と経路の運賃$f_{j,n}^{rs}$を決定する．航空便の座席数は所与の定数とする．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定されるが，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．以上によって，ハブ空港運営会社の利潤の定式化は着陸料を決定する利潤最大化問題として定式化できる. また, 航空会社の利潤の定式化は運賃と運航本数を決定する航空会社の利潤最大化問題として定式化できる．

(5) 旅客の行動

本研究では，旅客の経路の選択行動について以下の仮定をおく．

- 旅客の経路の選択行動はロジットモデルで表現されるものとする．
- 旅客が航空便を乗り継ぐ場合，出発空港から到着空港まで乗り継ぎ運賃で購入するものする．

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$n \in N$が運航する経路$j \in J_{rs}$を利用するときの効用$u_{j,n}^{rs}$を次のように定義する．

$$\begin{aligned} u_{j,n}^{rs} = {} & \alpha_1 \cdot f_{j,n}^{rs} + \alpha_2\left(\sum_{i\in I}\delta_i^j \cdot t_i + t_h\right) \\ & + \alpha_3\left\{\sum_{h\in H}\delta_h^j\left(d_{hb}(\mu_i^n)\right)\right\} \\ & + \sum_{h\in H}\delta_h^j \cdot \alpha_4\left(\sum_{i\in I}\delta_i^j \cdot \frac{1}{\sum_{k\in K}\mu_{i,n}^k}\right) \\ & + \sum_{h\in H}\delta_h^j \cdot \alpha_{5,h} \end{aligned} \quad \forall j \in J_{rs}, n \in N, rs \in \Omega \tag{8}$$

where

$$d_{hb}(\boldsymbol{\mu}_i^n) = t_{b0}\cdot \nu_1\left(\frac{\frac{x_{i,n}}{\mu_{i,n}}}{\sum_{i\in I}\delta_i^k \cdot w_k}\right)^{\nu_2} \quad \forall h \in H \tag{9}$$

$$x_{i,n} = \sum_{rs\in\Omega}\sum_{j\in J_{rs}} \delta_i^j \cdot q_{j,n}^{rs} \quad \forall n \in N, i \in I \tag{10}$$

ここで式(8)の各項は，運賃，飛行時間，乗り継ぎ時間，運航本数に基づいた待ち時間，各空港に固有の定数を表す．$d_{hb}(\boldsymbol{\mu})$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．$\alpha_{5,h}$はハブ空港$h \in H$に固有の定数である．式(10)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経路の旅客数の合計を表す．また，旅客の効用にガンベル分布に従う認知誤差$\boldsymbol{\varepsilon}_n = (\varepsilon_1, \cdots, \varepsilon_{|N|})$を加えることで，ランダム効用理論に基づいて航空会社$n \in N$が運航する経路$j \in J_{rs}$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．

$$f(\boldsymbol{\varepsilon}_n) = \exp\left(-\sum_{h\in H}\left(\sum_{n\in N}\exp\left(-\frac{\varepsilon_n}{\lambda}\right)^{\lambda}\right)\right) \qquad (11)$$

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$n \in N$が運航する経路$j \in J_{rs}$を選択する確率$p_{j,n}^{rs}$はロジットモデルに基づいて次のように表される．

$$p_{j,n}^{rs} = \frac{\exp\left(\frac{u_{j,n}^{rs}}{\lambda}\right)}{\sum_{j\in J_{rs}}\exp\left(\frac{u_{j,n}^{rs}}{\lambda}\right)} \qquad (12)$$

$$\forall j \in J_{rs}, n \in N, rs \in \Omega$$

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$n \in N$が運航する経路$j \in J_{rs}$の旅客数$q_{j,n}^{rs}$は，次のように表される．

$$q_{j,n}^{rs} = q_{rs} \cdot p_{j,n}^{rs} \qquad (13)$$
$$\forall j \in J_{rs}, n \in N, rs \in \Omega$$

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. テストネットワークを用いた数値計算

本章では，前章で構築したモデルの挙動を考察するため，テストネットワークを用いて数値計算結果を示す．

(1) テストネットワークの仮定

はじめに，簡単のためテストネットワーク内におい

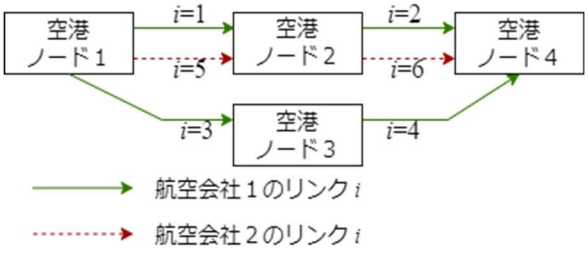


図-2 ノードとリンクの関係図

表-1 各リンクを運航する航空会社と所要時間

リンク	運航する航空会社	飛行時間[min]
1	1	100
2	1	180
3	1	120
4	1	130
5	2	100
6	2	180

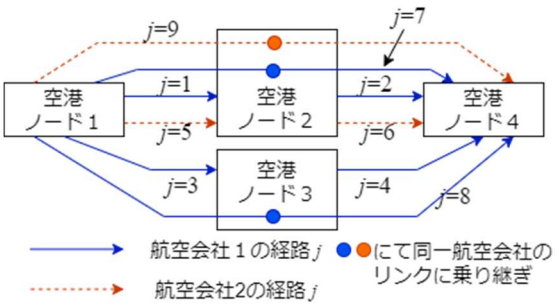


図-3 ノードと経路の関係図

表-2 各パラメータとその数値

パラメータ	数値	パラメータ	数値
η_1	600,000	α_1	-0.000025
η_2	1.45	α_2	-0.001
t_{b0}	15	α_3	-0.125
ν_1	3	α_4	-0.001
ν_2	20	λ	0.75
		w_k	165

表-3 OD ペアと OD 需要

O＼D	1	2	3	4
1	0	3,000	1,000	3,000
2	0	0	0	3,000
3	0	0	0	1,000
4	0	0	0	0

表-4 各ノードにおける空港運営会社の収入とコスト，発着容量と最小乗継

ノード	非航空系事業収入[JPY]	運営コスト[JPY]	発着容量[便/日]	最小乗継時間[min]
1	1,973,463	4,283,847	150	-
2	36,715	207,655	212	25
3	6,268	13,733	65	20
4	2,903,022	4,528,553	200	-

表-5 ハブ空港の着陸料

ノード	着陸料[JPY]	
	例 1	例 2
2	300,000	100,000
3	300,000	300,000

表-6 各リンクの運航本数

リンク	運航本数[便/日]	
	例 1	例 2
1	17.47	17.28
2	17.12	15.89
3	7.68	7.68
4	7.62	7.62
5	30.85	31.27
6	20.65	19.98

て旅客の移動は片方向のみを考えることとした．

テストネットワークでは 4 つのノードを仮定し，ノード 1 は起点，ノード 2，3 は起終点，ノード 4 は終点になりうる．そのため，5 つの OD ペア $\Omega = \{(1,2),(1,3),(1,4),(2,4),(3,4)\}$ が存在する．また，**図-2** のように，2 つの航空会社によって 6 リンクが設定される．リンク番号とリンクを運航する航空会社と所要時間は**表-2** に示される．また，リンクによって構成される旅客の経路は**図-3** のように，9 経路設定される．また，各ノードの非航空系事業収入と，運営コスト，発着容量，最小乗継時間は**表-4** に示す．

以上のテストネットワークを用いて**表-5** に示す 2 種類の着陸料を外生的に与え，着陸料の変化による航空会社と旅客の行動の変化を示す．

(2) テストネットワークの数値計算の結果

数値計算の結果を**表-6**，**表-7** に示す．

各表の例 1 の列と例 2 の列は，先の**表-5** における各空港の着陸料を課したときのリンクごとの運航本数，経路ごとの運賃と選択確率を示す．各指標の例 1 から例 2 への変化について，着陸料の変化の影響は以下の通りである．**表-6** は，それぞれの例で着陸料を設定したときのそれぞれのリンクの運航本数の計算結果を示す．ノード 2 を終点とするリンク 1 について，例 1 の運航本数より例 2 の運航本数が少ないことが示される．逆に，同じくノード 2 を終点とするリンク 5 について，例 1 の運航本数より例 2 の運航本数が多い．ノード 2 を起点とするリンク 2，6 について，例 1 の運航本数より例 2 の運航本数が少ない．また，ノード 3 を起点または終点とするリンク 3，4 について，例 1，例 2 の運航本数は同じである．

表-7 各経路の運賃と選択確率

経路	運賃[JPY]		経路選択確率	
	例 1	例 2	例 1	例 2
1	39,937	39,720	28.33%	28.01%
2	44,897	51,715	35.12%	32.57%
3	57,544	57,543	47.87%	47.87%
4	56,783	56,787	47.17%	47.17%
5	23,473	22,546	50.27%	50.96%
6	39,274	45,118	42.31%	40.77%
7	58,060	58,165	32.94%	32.78%
8	57,016	57,465	15.64%	15.64%
9	51,467	51,598	42.58%	42.62%

表-7 は，それぞれの例において着陸料を設定したときのそれぞれの経路の運賃と経路選択確率を示す．ノード 2 を終点とする経路 1，5 について，例 2 の運賃が例 1 の運賃より安い．ノード 2 を起点とする経路 2，6 について，例 2 の運賃が例 1 の運賃より高い．また同一地点を起終点とし，乗り継ぎを含んでいる経路 7，8，9 について，各経路の運賃は異なる結果を示す．例 2 の運賃が例 1 の運賃より高い．ノード 3 を起点，または終点としている経路 3，4 について，例 1 と例 2 を比較して運賃に大きな変化が起きていない．

(3) 数値計算の考察

例 1 と例 2 でノード 2 に異なる着陸料を設定したとき，着陸料の変化によって運航本数と運賃が変化している．そして，その影響を受け旅客の経路選択確率も変化している．しかし，着陸料の変化額に対して運航本数や運賃，旅客の経路選択確率の変化量は大きくない．また，経路 7，8 のように，同一の航空会社でも異なる経路を利用するときには，旅客に課される運賃が異なる．また乗り継ぎ運賃は，利用するそれぞれの航空便の運賃の和ではなく，新たな料金として解を求められた．それぞれの例は

数値計算によって，最適な運賃と運航本数を同時に算出できたといえる．

5. まとめ

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経由地の選択行動を考慮し，競争関係にある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．多くの既往研究では，2 便を乗り継ぐ際の運賃は 2 つのリンクに対応する運賃の和として仮定されてきたが，現実には乗り継ぎが行われると運賃が割り引かれる．一方で，本研究では経路ベースの運賃を導入し，同じリンクを使う旅客の中でも乗り継ぎを行う場合と行わない場合で運賃が異なるモデルを定式化し，モデルの挙動を確認した．また，既往研究では，運航本数のみを変化させていたのに対して，本研究では運賃や運航本数を考慮する定式化を行い，数値計算にて航空会社の利潤を最大化するような運航本数や運賃が存在することを確認した．

本研究では，各ステークホルダーのモデルをヒューリスティックスな解法を適用した．出力されるのは厳密解ではないため，厳密解法の構築が求められる．本稿においては，空港運営会社の利潤最大化問題において着陸料は所与として計算した．そのため今後は，着陸料も変数として数値計算を行う．将来的には，現実的な空港間競争を表現可能なモデルとするためにはモデル内のパラメータ推定を行うことを目指す．加えて，旅客のとる行動をより現実的に表現するため，旅客が複数の航空会社への乗継する際のモデルの定式化も検討する．

REFERENCES

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
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/unyou/y_20221124.pdf
3) Oh, J., & Huh, W. T. (2022). Hidden city travel and its impact on airfare: The case with competing airlines. Transportation Research Part B: Methodological, 156, 101-109.
4) Zhang, A., & Zhang, Y. (1997). Concession revenue and optimal airport pricing. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 33(4), 287-296.
5) Tae, H. O., Anming, Z., & Yimin, Z. (1996). A note on optimal airport pricing in a hub-and-spoke system. Transportation Research Part B, 1(30), 11-18.
6) 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.
7) Gong, Z., Zhang, F., Liu, W., & Graham, D. J. (2023). On the effects of airport capacity expansion under responsive airlines and elastic passenger demand. Transportation Research Part B: Methodological, 170, 48-76.
8) 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

(Received ?)

INTER-AIRPORT COMPETITION MODEL CONSIDERING PASSENGER AND AIRLINE BEHAVIOR

Ryusei KATSUTA, Ryuichi TANI, and Kenetsu UCHIDA