旅客のマルチクラス均衡配分に基づく航空市場分析法

各務　健介[1]・峪　龍一[2]・内田　賢悦[3]

[1]学生会員　北海道大学大学院　工学院（〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目）
E-mail:kensuke110@eis.hokudai.ac.jp

[2]正会員　北海道大学大学院　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　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

近年 LCC (Low-Cost-Carrier) の参入によるアジア圏の航空市場の発展が顕著である．FSC (Full-Service-Carrier) と LCC では遅延リスク等の移動時間の不確実性に違いが存在する．そのため，利用者の選択行動は移動の目的に応じて変化すると考えられる．本研究では，複数の利用者属性と航空輸送の移動時間の不確実性を考慮した航空市場分析モデルを提案する．また，LCC 国際線の国内地方空港への新規就航を想定し，就航前後の空港利用者数・企業の利潤・社会的便益の変化等を数値計算によって評価することでモデルの挙動を確認する．定式化においては，航空会社を FSC・LCC，利用者の移動目的をビジネス・観光に区別する．前者は航空輸送の移動時間の平均・標準偏差を外生的に与えることで差別化する．後者は移動目的に応じて異なる時間価値・移動時間信頼性価値を与えることで，マルチクラス均衡配分を行う．

Key Words: *airline network, airport congestion, Low-Cost-Carrier, multi-class, travel time uncertainty*

1. はじめに

アジア・太平洋地域における航空旅客数は近年，世界最大である [1]．近年は新型コロナウイルス感染症の影響が見られたものの，同地域の航空市場は今後も更なる成長が見込まれる．その要因として，各国の経済成長に伴う国民の平均所得の増加に加えて，LCC (Low-Cost-Carrier) の参入による航空運賃の低価格化が挙げられる．

日本においても，平成 24 年に LCC が就航して以降，LCC旅客数は大幅に増加している．政府は，LCCを含む国際線就航を通じた訪日外国人旅行客の増加や新たな需要喚起などを目的に様々な施策に取り組んでいる．

一方課題として，日本国内では羽田空港・成田空港などの主要空港の空港容量の逼迫・混雑が問題となっている．アジア地域の航空市場の拡大により，空港利用者はさらに増加することが予想されており，空港機能強化などの対応策が進められている．また，訪日外国人旅行客数の増加には地方部の空港に国際線を誘致することによる誘客促進が重要であり，地方空港の空港着陸料の低減や，旅客の受入環境の強化といった取り組みがなされている．以上のことから，日本は LCC や地方空港への国際線誘致による旅客数の増加と，主要空港の混雑緩和の 2 つの課題に同時に取り組む必要がある．

本研究では，そのような状況を想定し，地方空港に新たに国際線が参入する場合を考える．これにより利用者は従来の主要空港を回避した，地方空港を経由する経路が新たな選択肢として与えられ，空港の混雑状況に影響を及ぼす．利用者の経路選択が変わることで各航空路線・空港の利用者数が変化し，それに応じて航空会社と空港事業者が取るべき戦略も変化すると考えられる．

こうした複数のステークホルダーから構成される航空市場を題材とした旅客配分モデルは，これまでに多くの既存研究によって提案されてきた．その例として，芦谷 [2]では，国外航空会社・国内航空会社・高速鉄道 (HSR) ・利用者からなる航空市場をモデル化し，各航空会社が HSR とそれぞれ協力関係となった際の社会的便益の差異について分析している．Tani et al. [3]では，北海道の航空市場を対象とし，旅客，空港事業者，航空会社の行動モデルを提案した上で，空港の一括民営化の導入が航空市場に与える影響について分析している．しかし，

上記の 2 つの論文はあくまで空港混雑を考慮しないモデルでの分析に留まっている．

利用者や航空会社等の行動を記述する上で，空港の混雑を考慮した既存研究も複数存在する．Takebayashi [4]では，滑走路容量の制約による空港の混雑と航空機サイズの影響を考慮した航空会社と利用者の行動を分析するモデルを用いて，複数空港システムに対する適切な空港経営の在り方について議論している．この論文では，滑走路の容量制約に基づく混雑を，ラグランジュ乗数を用いて表現している．Takebayashi [5]では Takebayashi [4]のモデルに新たに空港事業者の行動を考慮し，空港と HSR の協力関係が市場にもたらす影響について分析しており，小規模空港と HSR の連携が大規模空港の混雑を緩和し，空港収益を増加させると結論付けている．また，Wan et al. [6]は，空港ターミナルの混雑と滑走路の混雑を区別した上で旅客の一般化コストをモデル化し，空港混雑の経済的影響と適切なターミナル投資について検討している．具体的には，空港ターミナルの混雑を出発手続きの前後で発生する手続きの待ち行列コストとラウンジ内の滞留時間コストで表現し，滑走路の混雑はフライトの遅延を滑走路容量と同時間帯の総旅客の比を用いて表現することで，任意の時間帯に空港に到着する旅客の一般化コストを定義している．Kawakita et al. [7]は旅客の混雑に伴う航空輸送と HSR の乗り継ぎ成否の不確実性を考慮した旅客の均衡配分モデルを提案している．

これらの既存研究は，いずれも航空会社は FSC (Full-Service-Carrier) を仮定したモデルを提案しており，LCC の存在を考慮していない．FSC と LCC では航空機の機材繰りによる遅延といった，移動時間の不確実性に違いが存在する．加えて，FSC と LCC では利用者の移動目的（ビジネス・観光など）が異なっている．利用者属性によって時間価値と移動時間の変動に関する価値（以降，移動時間信頼性価値とする）は異なるため，FSC と LCC の選択行動を記述するためには，こうした利用者の異質性を考慮したモデルを検討する必要がある．Kawakita et al. [7]では，旅客の乗り継ぎの成否の不確実性を考慮したモデルを提案しているが，移動時間そのものの不確実性及び混雑関数は明示的に表現していない．Wan et al. [6]ではビジネス客，観光客の時間コストを両者の時間価値の違いにより差別化したモデルを提案している，また LCC に関する研究についても Su et al. [9]，Kuljanin et al. [10]，Inoue et al. [11]などを例に複数存在するが，上記事項を旅客配分モデルとして定式化し分析している研究は著者らの知る限り存在しない．

そこで本研究では，利用者属性の異質性と航空輸送の移動時間の不確実性を考慮した航空市場分析モデルを提案する．LCC 国際線が国内地方空港に参入する状況を想定し，国内主要空港の混雑緩和に与える影響について，利用者の行動及び航空会社・空港事業者の収益性の観点から分析する．

具体的な手法として，航空輸送に関して，FSC，LCC の移動時間の平均・標準偏差をそれぞれ外生的に与えることで，各航空会社における不確実性を表現する．利用者の移動目的はビジネス・観光の 2 つに大別する．それぞれの移動目的を有する利用者に対して異なる時間価値・移動時間信頼性価値を与えることで，利用者属性の異質性を考慮した効用関数を提案する．続いて，定義した効用関数を用いてマルチクラス型の利用者配分モデルを定式化し，当配分に基づき LCC の存在を考慮した航空市場分析モデルを開発する．

本稿の構成を以下に示す．第 1 章では，本研究の背景とモデルの概要を述べた．第 2 章では，本研究における分析対象となるネットワークモデルの概要とその仮定を示す．第 3 章では，モデルの定式化を示す．第 4 章では，第 2 章で示したテストネットワークを用いた数値計算例を示す．第 5 章では，本研究をまとめ，今後に研究において改善が必要と見込まれる点や展望について示す．

2. モデルの仮定

本研究で用いるモデル (**図-1**) と，モデル化における仮定を以下に示す．

- 航空市場を国外市場 (Zone1) と国内市場 (Zone2) に分け，それぞれに Central Business District (CBD) を 1 ヵ所ずつ設定する．CBD1，CBD2 はそれぞれ Zone1，Zone2 の中心市街地を表す．利用者は CBD1-CBD2 間を移動し，そこでの需要（OD 交通量）は一定である．
- Zone2 には国内主要空港（空港 B）と国内地方空港（空港 C）の 2 つの空港が存在する．利用者は両空

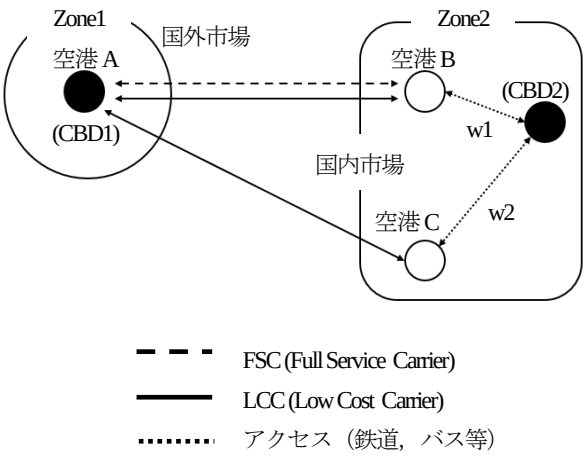


図-1 航空市場のネットワークモデル

港とCBD2を結ぶ鉄道・バス等の航空以外のアクセス交通を利用できる．また，空港CからCBD2よりも空港BからCBD2までのアクセス時間の方が短い（地方空港より主要空港の方が CBD に近い）と仮定する．

- アクセス交通のサービス性（運賃，所要時間，運行頻度）は与件であるとする．
- CBD 間を空港 C 経由で移動する利用者には，航空とアクセス交通の乗り継ぎにおいて，航空運賃に一定の運賃割引が適用される．運賃割引は，空港Cがアクセス交通の事業者に補助金を支援することで実現されるものとする．
- 空港A-B間はFSCとLCCの2つの航空路線があり，それぞれ別の航空会社がサービスを提供する．両社は常に競争関係にあると仮定する．また，これらの2つの航空路線は，それぞれ別々の経路として扱うものとする．
- 空港 A-C 間は LCC のみが就航し，空港 A-B 間の LCC と同一の航空会社がサービスを提供する．
- 簡単のため，各航空路線の名称は以下のように表記して議論する．
  ① 空港 A-B 間の FSC 国際線：「M-FSC」
  ② 空港 A-B 間の LCC 国際線：「M-LCC」
  ③ 空港 A-C 間の LCC 国際線：「L-LCC」
- L-LCCが未就航の場合と，L-LCCが就航する場合の2つのケースを想定し，両ケースにおいて空港ごとの利用者数及び航空会社・空港事業者の収益の変化について分析する．

3. モデルの定式化

(1) 記号

本稿で用いる記号を以下に示す．

Ω ODペアの集合
N 航空会社の集合
W アクセス交通の集合
H 空港の集合
z 利用者の属性 $(\forall z \in \{b: business, s: sightseeing\})$
π^n 航空会社$n \in N$の利潤
π^h 空港$h \in H$の利潤
L^n 航空会社$n \in N$が提供するリンクの集合
L^{-n} 航空会社$n \in N$以外の航空会社（競合他社）が提供するリンクの集合
K^{rs} ODペアrsの経路の集合
X_z^{rs} ODペアrs，属性z（$\forall z \in \{b,s\}$）利用者の交通需要
$x_{k,z}^{rs}$ OD ペアrsの経路kにおける属性z（$\forall z \in \{b,s\}$）利用者の交通量
$u_{k,z}^{rs}$ OD ペアrsの経路kにおける属性z（$\forall z \in \{b,s\}$）利用者の効用
y_{l^n} リンク$l^n \in L^n$における交通量
f_{l^n} リンク$l^n \in L^n$における運行頻度
p_{l^n} リンク$l^n \in L^n$における運賃
v_{l^n} リンク$l^n \in L^n$における航空機サイズ（座席数）
$\alpha_{i,z}, \alpha_{k,z}^{rs}$ 効用関数におけるパラメータ
p_k^{rs} ODペアrsの経路kにおける航空運賃
p_w^{rs} ODペアrsにおけるCBDと空港との接続にかかる費用
$\delta_{l^n}^{rs,k}$ ODペアrsの経路kがリンクl^nを通るとき1，そうでないとき0をとる変数
$\delta_w^{rs,k}$ 交通アクセス$w \in W$がODペアrsの経路kを通るとき1，そうでないとき0をとる変数
w_k^{rs} ODペアrsの経路kにおけるCBD2との接続にかかる一般化費用
$C_{l^n}^{OP}$ リンク$l^n \in L^n$における総オペレーションコスト
$C_{l^n}^{Base}$ リンク$l^n \in L^n$における空港着陸料以外のオペレーションコスト
t_k^{rs} OD ペアrsの経路kにおける航空路線の所要時間
t_w^{rs} OD ペアrsにおける CBD2 と国内空港との接続所要時間
θ 確率的利用者均衡モデルの分散パラメータ
$\mathbf{f}^{L^n}$ リンク集合L^nに設定する運行頻度ベクトル
$\tilde{\mathbf{f}}^{L^{-n}}$ 航空会社$n \in N$以外の航空会社よって提供される，最適戦略時の運行頻度ベクトル
$\mathbf{f}_{\mathbf{l}^n}$ 航空会社$n \in N$がリンク$l^n \in L^n$に提供する最適な運行頻度ベクトル
ρ 地方空港国際線とアクセス交通の乗り継ぎ利用者に適用される運賃割引率
β_z 移動目的がzの利用者の航空輸送の移動時間に対する時間価値
γ_z 移動目的がzの利用者の航空輸送の移動時間の不確実性に対する移動時間信頼性価値
$\delta_{Access}^{(1,2)}$ 利用者が OD ペア$(1,2)$において L-LCC とアクセス交通の乗り継ぎを利用するとき 1，そうでないとき0を取る変数
q^h 空港$h \in H$が航空路線に課す空港着陸料
$\tilde{q}^{-h}$ 空港$h \in H$以外の空港が航空会社に課す最適戦略時の空港着陸料
$\delta_h^{l^n}$ リンク$l^n \in L^n$の航空路線が空港$h \in H$に着陸するとき1，そうでないとき0をとる変数
F_h^n 航空会社$n \in N$の空港$h \in H$における滑走路

容量
u_{rs}^{z} ODペアrs，属性z（$\forall z \in \{b,s\}$）利用者の最大効用
$\mathbf{x}$ 経路交通量ベクトル
$\mathbf{x}^{*}$ 利用者均衡状態時の経路交通量ベクトル
$\boldsymbol{\Psi}$ 実行可能領域における経路交通量ベクトル

(2) 航空会社の行動

各航空会社は利潤を最大化するように行動する．各航空会社の利潤を以下のように定義する．

$$\pi^{n}\left(\mathbf{f}^{L^n}, \tilde{\mathbf{f}}^{L^{-n}}\right) = \sum_{rs\in\Omega}\sum_{k\in K^{rs}}\sum_{l^n\in L^n} p_{l^n}\cdot \hat{x}_{k,z}^{rs}\cdot \delta_{l^n}^{rs,k} - \sum_{l^n\in L^n} C_{l^n}^{OP}\cdot f_{l^n} \quad (1)$$

where $\mathbf{f}^{L^n} = \{f_{l^n}\ \forall l^n \in L^n, \forall n \in N\}$

$\hat{x}_{k,z}^{rs}$は航空会社nの行動に対する最適な経路交通量を表し，利用者の行動に関する変分不等式問題の解して得られるものである．航空会社は他社の運航頻度を所与として，自社の運行頻度を制御することで企業の利潤最大化を目的として行動する．

航空会社nの利潤最大化問題は式(2) - (4) のように表される．

$$\max_{\mathbf{f}^{L^n}} \pi^{n}\left(\mathbf{f}^{L^n}, \tilde{\mathbf{f}}^{L^{-n}}\right) = \sum_{rs\in\Omega}\sum_{k\in K^{rs}}\sum_{l^n\in L^n} p_{l^n}\cdot \hat{x}_{k,z}^{rs}\cdot \delta_{l^n}^{rs,k} - \sum_{l^n\in L^n} C_{l^n}^{OP}\cdot f_{l^n} \quad (2)$$

subject to

$$\sum_{l^n\in L^n} f_{l^n}\cdot \delta_h^{l^n} \le F_h^n \text{ , for } \forall l^n \in L^n \quad (3)$$

$$\mathbf{f}^{L^n} > 0 \quad (4)$$

where $\mathbf{f}^{L^n} = \{f_{l^n}\ \forall l^n \in L^n, \forall n \in N\}$

式(2)の右辺第 1 項は運輸収入，右辺第 2 項はオペレーションコストを表す．なお，オペレーションコスト$C_{l^n}^{OP}$は空港着陸料を考慮して式(5)のように表される．

$$C_{l^n}^{OP} = C_{l^n}^{Base} + \sum_{h\in H} q_h\cdot v_{l^n}\cdot \delta_h^{l^n} \quad \forall l^n \in L^n, \forall n \in N \quad (5)$$

式(5)の右辺第 1 項は空港着陸料以外で発生するオペレーションコストであり，その値は一定とする．右辺第 2 項は空港着陸料によるオペレーションコストである．また，式(3)は航空会社nの滑走路容量制約である．式(4)は運航頻度ベクトル$\mathbf{f}^{L^n}$の非負制約であり，航空会社はリンクからの撤退は行わないと仮定する．

(3) 空港事業者の行動

空港事業者の目的は様々であるが，本研究では民間企業のように空港の利潤最大化を目的として行動すると仮定して定式化を行う．

a) 国内主要空港・国外空港の利潤関数

国内主要空港及び国外空港では空港着陸料をコントロールすることで利潤最大化を行う．国内主要空港・国外空港の利潤最大化問題は式(6), (7)のように表される．

$$\max \pi^{h}(q^h, \tilde{q}^{-h}) = q^h\cdot \sum_{n\in N}\sum_{l^n\in L^n} f_{l^n}\cdot v_{l^n}\cdot \delta_h^{l^n} \quad \forall h \in H \quad (6)$$

subject to

$$\mathbf{f}_{l^n} = arg\left\{max\ \pi^{n}\left(\mathbf{f}^{L^n}, \tilde{\mathbf{f}}^{L^{-n}}\right) \text{ subject to (3) and (4)}\right\} \quad \text{for } \forall l^n \in L^n, \forall n \in N \quad (7)$$

制約条件(7)は航空会社nの利潤最大化問題の解として最適な運行頻度が得られていることを意味する．

b) 国内地方空港の利潤関数

国内地方空港では，L-LCC が未就航の際は，モデル上空港 C を発着する航空路線が存在しないため，収益を 0 として，就航時との収益の差異を比較する．国内地方空港では空港着陸料による収入に加えて，L-LCC +アクセス交通乗り継ぎ利用者の運賃割引の実施に必要な費用を，アクセス交通への補助金として負担すると仮定する．以上より，国内地方空港の利潤最大化問題は式(8), (9)のように表される．

$$\max \pi^{h}(q^h, \tilde{q}^{-h}) = q^h\cdot \sum_{n\in N}\sum_{l^n\in L^n} f_{l^n}\cdot v_{l^n}\cdot \delta_h^{l^n} - \rho\cdot \sum_{k\in K^{rs}}\sum_{rs\in\Omega} x_{k,z}^{rs}\cdot \delta_{Access}^{(1,2)} \quad \forall h \in H \quad (8)$$

subject to

$$\mathbf{f}_{l^n} = arg\left\{max\ \pi^{n}\left(\mathbf{f}^{L^n}, \tilde{\mathbf{f}}^{L^{-n}}\right) \text{ subject to (3) } and \text{ (4)}\right\} \quad \text{for } \forall l^n \in L^n, \forall n \in N \quad (9)$$

(4) 利用者の行動

a) 利用者の効用関数

OD ペアrs，ルートkにおける利用者の効用関数は式(10)のように表される．

$$u_{k,z}^{rs}\left(x_{k,z}^{rs}\right) = \alpha_{1,z}\cdot\left(\overline{t_k^{rs}} + \sum_{w\in W}\delta_w^{rs,k}\cdot t_w^{rs}\right) + \alpha_{2,z}\cdot\sigma_{rs,k} + \alpha_{3,z}\cdot\left(p_k^{rs} + \sum_{w\in W}\delta_w^{rs,k}\cdot p_w^{rs} - \rho\cdot\delta_{Access}^{(1,2)}\right) + \alpha_{4,z}\cdot \mathrm{d}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{rs}}\left(x_{k,b}^{rs}, x_{k,s}^{rs}\right) + \sum_{l^n\in L^n}\frac{\alpha_{5,z}}{f_{l^n}}\cdot\delta_{l^n}^{rs,k} + \alpha_{k,z}^{rs} \quad \forall l^n \in L^n, \forall n \in N, \forall k \in K^{rs}, \forall rs \in \Omega, \forall w \in W, \forall z \in \{b,s\} \quad (10)$$

右辺第 1 項，第 2 項は移動時間に基づく項であり，後ほど説明する．右辺第 3 項は運賃に関する項である．各経路のうち，L-LCC＋アクセス交通の乗り継ぎのルートを利用する際は運賃割引が適用されることを反映している．右辺第 4 項は空港の混雑による利用者の不効用を表す項である．Takebayashi [4]では，容量制約に基づく混雑を，ラグランジュ乗数を用いて表現している．この場合，空港容量に達しない限りは待ち時間が 0 と計算されるが，一般的に容量が逼迫するほど航空輸送の移動時間の不確

実性が増加し，利用者の不効用は交通量に比例して漸次大きくなると考えられる．したがって本研究では空港内の混雑による待ちが非線形近似されるものと仮定して，容量制約に基づく混雑コストを表現する．混雑コスト関数$\mathrm{d}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{rs}}\left(x_{k,b}^{rs}, x_{k,s}^{rs}\right)$は以下のように表される．

$$\mathrm{d}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{rs}}\left(x_{k,b}^{rs}, x_{k,s}^{rs}\right)=\left(\frac{x_{k,b}^{rs}+x_{k,s}^{rs}}{v_{l^n}\cdot f_{l^n}}\right)^{m}\quad \forall k\in K^{rs}, \forall rs\in\Omega \tag{11}$$

mは混雑コスト関数$\mathrm{d}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{rs}}\left(x_{k,b}^{rs}, x_{k,s}^{rs}\right)$のパラメータである．また，式(10)の右辺第 5 項は運行本数から得られる平均待ち時間 (Takebayashi [4]) であり，ダイヤ遅れの影響を考慮したものである．

さて，航空による移動時間t_k^{rs}について，LCC と FSC では航空機の機材繰りによる遅延といった，移動時間の不確実性に違いが存在すること，利用者の移動目的（ビジネス・観光）によって時間価値・移動時間信頼性価値に違いがあることを表現するため，式(12)のように移動時間信頼性の概念を導入している．

$$t_k^{rs}=\alpha_{1,z}\cdot\overline{t_k^{rs}}+\alpha_{2,\mathrm{z}}\cdot\sigma_{rs,k} \tag{12}$$

$\overline{t_k^{rs}}$はt_k^{rs}の平均，$\sigma_{rs,k}$はt_k^{rs}の標準偏差であり，正規分布に従うものとする．ここで，式(10)，(12)より，時間価値β_zと移動時間信頼性価値γ_zを式(13)で定義する．

$$\begin{cases}\beta_z=\dfrac{\alpha_{1,z}}{\alpha_{3,\mathrm{z}}}\\ \gamma_z=\dfrac{\alpha_{2,z}}{\alpha_{3,\mathrm{z}}}\end{cases} \tag{13}$$

ここで，ビジネス利用者の方が運賃より移動時間を重視し，フライトの遅延・欠航等のリスクに敏感な傾向にあると仮定する．したがって，利用者属性$z\in\{b,s\}$の（時間価値，移動時間信頼性価値）をそれぞれ(β_B,γ_B)，(β_S,γ_S)とすれば，以下のような関係が成立する．

$$\begin{cases}\beta_B>\beta_S\\ \gamma_B>\gamma_S\end{cases} \tag{14}$$

b) 確率的利用者均衡配分

Takebayashi [4]の The bi-level model においては，シングルクラスにおける利用者の行動を確率的利用者均衡配分モデルとして定式化し，等価な最適化問題に置き換えている．しかし本研究では，異なる利用者属性（ビジネス・観光）を考慮することによる，マルチクラスの利用者の行動を考えている．そのため，利用者のリンクコスト関数から計算される Hesse 行列は非対称となり，確率的利用者均衡配分を最適化問題として定式化することはできない．そこで，均衡条件を経路交通量に関する変分不等式問題として定式化する．ロジット型の確率的利用者均衡配分の均衡条件は以下の式(15) - (18)のように表される．

$$\begin{cases} x_{k,z}^{rs}\cdot\left\{-u_{k,z}^{rs}\left(x_{k,z}^{rs}\right)+\dfrac{1}{\theta}\ln\left(\dfrac{x_{k,z}^{rs}}{X_z^{rs}}\right)+u_{rs}^{z}\right\}=0 & (15)\\ -u_{k,z}^{rs}\left(x_{k,z}^{rs}\right)+\dfrac{1}{\theta}\ln\left(\dfrac{x_{k,z}^{rs}}{X_z^{rs}}\right)+u_{rs}^{z}\geq 0, x_{k,z}^{rs}\geq 0 & (16)\end{cases}$$

$$\begin{cases} -u_{rs}^{z}\cdot\left\{\sum_{k\in K^{rs}}x_{k,z}^{rs}-X_z^{rs}\right\}=0 & (17)\\ \sum_{k\in K^{rs}}x_{k,z}^{rs}-X_z^{rs}\geq 0 & (18)\end{cases}$$

$$\forall rs\in\Omega,\ \forall k\in K^{rs},\ \forall z\in\{b,s\}$$

ここで，u_{rs}^{z}は OD ペアrs，利用者属性zの利用者の最大効用を表す．

均衡条件を経路交通量のみを変数とした変分不等式問題として以下の式(19)のように定義する．

$$\begin{aligned}&\text{Find } \mathbf{x}^{*}\in\boldsymbol{\Psi}\\ &s.t.\ \sum_{rs\in\Omega}\sum_{k\in K^{rs}}\sum_{z}\left[\frac{1}{\theta}\ln\left(\frac{x_{k,z}^{rs\,*}}{X_z^{rs}}\right)-u_{k,z}^{rs}\left(x_{k,z}^{rs\,*}\right)\right]\\ &\qquad\cdot\left(x_{k,z}^{rs}-x_{k,z}^{rs\,*}\right)\leq 0\\ &\qquad\forall\mathbf{x},\mathbf{x}^{*}\in\boldsymbol{\Psi}\end{aligned} \tag{19}$$

where

$$\mathbf{x}=\{x_{k,z}^{rs}\ \forall k\in K^{rs},\forall rs\in\Omega,\forall z\in\{b,s\}\}$$

$$\boldsymbol{\Psi}=\left\{\mathbf{x}\middle|X_z^{rs}=\sum_{k\in K^{rs}}x_{k,z}^{rs}\ \forall rs\in\Omega,\forall z\in\{b,s\},x_{k,z}^{rs}\geq 0\ \forall rs\in\Omega,\forall k\in K^{rs},\forall z\in\{b,s\}\right\}$$

(5) 余剰の変化，社会的便益の定式化

L-LCC の就航前後での消費者・生産者余剰の変化及び社会的便益の定式化を行う．ここで，L-LCC 就航前・就航後をそれぞれ"Case1"，"Case2"と呼ぶことにする．

まず消費者余剰の変化はビジネス利用者・観光利用者の消費者余剰の変化を合計することによって導出される．消費者余剰ΔU^{c}は以下の式(20)で表される．

$$\Delta U^{c}=\sum_{z}-\frac{X_b^{rs}}{\theta\cdot\alpha_{3,\mathrm{z}}}\cdot\left\{ln\sum_{k\in K^{rs}}exp\left(\theta\cdot u_{k,z}^{rs,Case2}\right)-ln\sum_{k\in K^{rs}}exp\left(\theta\cdot u_{k,z}^{rs,Case1}\right)\right\} \tag{20}$$

ここで，$u_{k,z}^{rs,\ Case1}$，$u_{k,z}^{rs,\ Case2}$はそれぞれ Case1，Case2 における，OD ペアrs，利用者属性zの利用者の最大効用を表す．

次に生産者余剰の変化は，L-LCC の就航前後における航空会社の利潤の変化と空港事業者の利潤の変化の合計

値として求められる．生産者余剰の変化ΔU^pは以下の式 (21) で表される．

$$\Delta U^p = \sum_{n\in N}(\pi^{n,Case2} - \pi^{n,Case1}) + \sum_{h\in H}(\pi^{h,Case2} - \pi^{h,Case1}) \quad (21)$$

ここで，$\pi^{n,Case1}$，$\pi^{n,Case2}$はそれぞれ Case1，Case2 における航空会社$n \in N$の利潤，$\pi^{h,Case1}$，$\pi^{h,Case2}$も同様にそれぞれ空港$h \in H$の利潤を表す．

以上より，社会的便益ΔUは以下の式 (22) で表される．

$$\Delta U = \Delta U^c + \Delta U^p \quad (22)$$

4. 数値計算

(1) 計算条件の設定

図-1 で示したネットワークを用いて数値計算を行い，L-LCC の就航前後における計算結果を比較し，モデルの挙動を確認する．数値計算を行うにあたり，新たに設定する仮定を以下に示す．

1) 利用者の移動は国外→国内の方向に限定する．
2) 空港着陸料は外生的に与えられ，数値計算の過程で値は変化しない．
3) モデル上の利用者は，航空会社やアクセス交通が提供しない代替経路を選択することができる．

1) により，各経路における航空会社のオペレーションコストは一意に定まる．このとき，国外空港に該当する空港 A の利潤及び利用者数は常に 0 となる．2) は，空港事業者の行動を固定することを表し，空港着陸料が政策的に決められると仮定する．3) は利用者が自身の効用に応じて，ネットワーク外の交通手段を利用する，あるいは旅行を取りやめることが選択肢として与えられていることを表す．**図-1** を基に作成した数値計算の適用対象ネットワークは以下の**図-2** の通りである．また，Case1，Case2 でそれぞれ利用可能な経路とその通過リンクを以下の**表-1** に示す．ネットワークは 4 ノード，5 リンクで構成され，ノード 1 からノード 4 までの 1 つの OD ペアを考える．各ノードは，ノード 1：空港 A (CBD1)，ノード 2：空港 B，ノード 3：空港 C，ノード 4：CBD2 を表し，各リンクは，L1：M-FSC，L2：M-LCC，L3：L-LCC，L4：アクセス交通 1，L5：アクセス交通 2 を表す．ネットワーク全体の OD 需要は 4000 [人] (ビジネス：2000 [人]，観光：2000 [人]) で一定とする．図中のリンクパラメータは [所要時間 [min]，運賃 [USD]] を表す．航空輸送の移動時間の標準偏差の値は，L1 で 30 [min]，L2，L3 で 120 [min]とする．その他の航空路線の定数値を以下の**表-2** に示す．空港着陸料は空港 B では M-FSC：15 [USD]，M-LCC：8 [USD]，空港 C では L-LCC：4 [USD] する．また，各利用者属性の効用関数のパラメータは，以下の**表-3** の通りに設定する．このとき，時間価値β_z，移動時間信頼性価値γ_zの値は式 (14) を満たす．混雑コストのパラメータmを 4，SUE の分散パラメータθを 1 とする．仮定 3) で設定した代替経路の効用（ダミー効用）は-10 とする．L-LCC+アクセス交通の乗り継ぎ利用者に適用される運賃割引率ρは 0 とする．

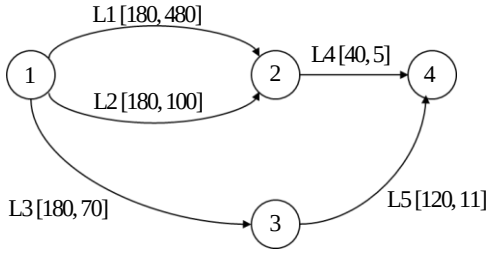


図-2 数値計算の対象ネットワーク

表-1 対象ネットワークの経路情報

Case1	Case2	経路	通過リンク
○	○	1	L1，L4
○	○	2	L2，L4
	○	3	L3，L5

(2) 計算結果

a) 空港利用者数，航空路線別利用者数

Case1→Case2 における空港利用者数の変化率を**表-4** 示す．比較のため，利用者が (A) マルチクラスの場合の計算結果に加えて，シングルクラスの場合の結果を(B) シングルクラス（ビジネス），(C) シングルクラス（観光）に示す．まず**表-4** (A) の結果に着目すると，国外空港の利用者数の変化率は合計で+1.94 [%] となった．これは L-LCC の新規就航により均衡状態における利用者の効用が

表-2 各航空路線の諸データ

	M-FSC	M-LCC	L-LCC
航空機座席数	264	180	180
オペレーションコスト 固定費 [USD]	14000	7000	7000
本数制約 [本/日]	10	8	5
初期運航頻度 [本/日]	4	2	1

表-3 効用関数のパラメータ

利用者属性	$\alpha_{1,z}$	$\alpha_{2,z}$	$\alpha_{3,z}$	$\alpha_{4,z}$	$\alpha_{5,z}$	$\alpha_{k,z}$
ビジネス $(z=b)$	-0.012	-0.018	-0.004	-0.5	-3	-2
観光 $(z=s)$	-0.008	-0.012	-0.008	-0.5	-3	-2

改善し，結果的にネットワーク全体の利用率が上昇したことを表す．国内主要空港の利用者数に着目すると，ビジネス利用者の利用者数の変化率が-4.92[%]に対し，観光利用者は-18.18[%]と両者で 3 倍以上の差が開いた．これは時間価値・移動時間信頼性価値が相対的に小さい観光利用者が，運賃の安い L-LCC を好む傾向にあり，結果的により多くの利用者が国内地方空港の利用にシフトしたと考えられる．次に (A)の合計・(B)・(C)の結果同士を比較すると，変化率の大小関係は両空港とも (B) < (A) < (C)となり，その値にギャップが存在する．これは利用者属性を十分に考慮しないと空港利用者数の推定を過小評価あるいは過大評価してしまうリスクがあることを示唆している．マルチクラスで分析を行うことは，こうした政策立案のミスリードを防ぐという点において一定の有用性があると考えられる．

Case1→Case2 における航空路線別の利用者数の変化率を整理した結果を**表-5** に示す．なお，比較のため移動時間不確実性を考慮しない ($\sigma_{rs,k} = 0$) 場合でも数値計算を実施した．**表-5 (A)** の結果に着目すると，M-FSC，M-LCC の両者とも総じて利用者数が減少しており，観光利用者の方がより多くの割合で L-LCC にシフトしている．M-LCC より M-FSC の方が利用者数の減少率が大きいのは，M-LCC の混雑を嫌って M-FSC を選択していた層の多くが LCC にシフトしたためであると考えられる．また，M-LCC を選択するビジネス利用者の割合のみ増加している．これは当初 M-LCC を選択していたビジネス利用者と観光利用者がより安価な L-LCC にシフトしたことで混雑コストが減少し，結果的に M-FSC を選択していたビジネス利用者のうち，相対的に運賃を重視する層

表-4 Case1→Case2 における空港利用者数の変化率（(A) マルチクラス，(B) シングルクラス（ビジネス），(C) シングルクラス（観光））

空港名	空港利用者数の変化率[%]				
	(A)			(B)	(C)
	ビジネス	観光	合計		
国外空港	+1.3	+2.57	+1.94	+0.69	+5.45
国内主要空港	-4.92	-18.18	-11.58	-4.83	-26.39

表-5 Case1→Case2 における航空路線別利用者数の変化率（移動時間不確実性を (A) 考慮する，(B) 考慮しない）

	航空路線	利用者数の変化率[%]		
		ビジネス	観光	合計
(A)	M-FSC	-10.89	-31.53	-16.53
	M-LCC	+12.5	-13.06	-6.43
(B)	M-FSC	-37.87	-59.88	-44.45
	M-LCC	+15.75	-23.15	-9.56

が M-LCC にシフトしたと考えられる．(A)，(B)の結果を比較すると，不確実性を考慮する(A)の方が減少率が小さくなっており，これは直感的に現実に即している．航空路線別で比較すると M-FSC の変化率の値の方がよりギャップが大きくなっている．これは移動時間への感度が高い利用者層の行動を表現する上で不確実性の考慮が重要になりうることを示唆している．

b) 各種余剰の変化，社会的便益

L-LCC 就航による各種余剰の変化，便益の結果を**図-3** に示す．消費者余剰の変化は+194629 [USD]，生産者余剰の変化は -56568 [USD]，社会的便益は 139861 [USD] となり，政策的に有意と言える．消費者余剰の変化が正となったのは，L-LCC 就航により OD 間の航空路線の運航頻度の合計が増加し，結果的にネットワーク全体の混雑が緩和されたことが主な要因であると考えられる．実際，運航頻度の合計は Case1 では 16.17 [本/日] (M-FSC : 8.17 [本/日]，M-LCC : 8 [本/日])，Case2 では 17.96 [本/日] (M-FSC : 7.48 [本/日]，M-LCC : 8 [本/日]，L-LCC : 2.48 [本/日])となり増加している．M-LCC の運航頻度は L-LCC 就航後も容量制約の上限値である 8 [本/日] を維持しており，空港のキャパシティによって運航頻度及び消費者余剰は変化すると考えられる．また生産者余剰の変化の値の内訳は，FSC 航空会社の利潤の変化が-59957[USD]，LCC 航空会社の利潤の変化が+4342[USD]，国内主要空港の利潤の変化が-2735[USD]，国内地方空港の利潤の変化が+1782[USD]となった．負値となったのは，M-FSC の利用者減少による FSC 航空会社の減収，空港着陸料がより安価な国内地方空港に利用者が流れたことによる空港全体の着陸料収入の減収の影響が大きいと考えられる．

c) 国内地方空港の空港着陸料低減の効果

国内地方空港の空港着陸料q^cを 4 [USD] から 0 [USD]まで 0.1 [USD] (2.5 [%]) ずつ変化させ，それぞれについて数値計算を行うことで，国内地方空港の空港着陸料低減の効果について分析した．まず，着陸料低減時の国内空港

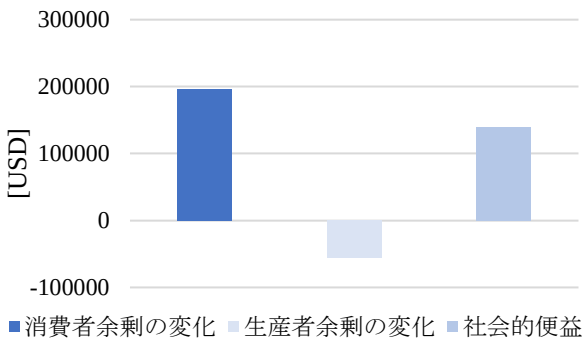


図-3 各種余剰の変化，社会的便益

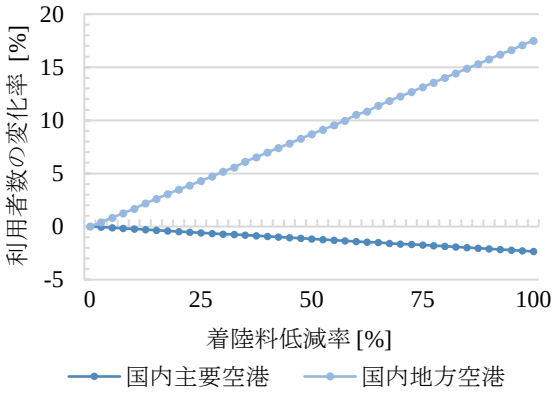


図-4　空港着陸料低減時の空港利用者数の変化率の推移

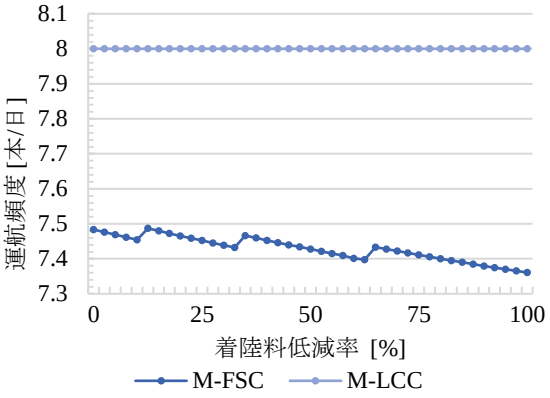


図-6　空港着陸料低減時の M-FSC，M-LCC の運航頻度の推移

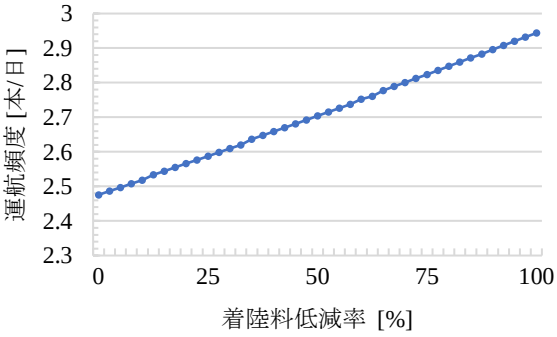


図-5　空港着陸料低減時の L-LCC の運航頻度の推移

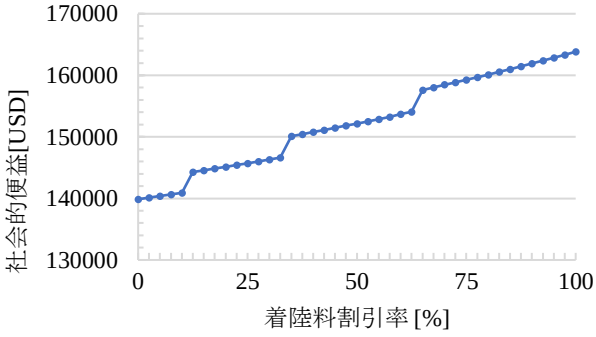


図-7　空港着陸料低減時の社会的便益の推移

の利用者数の変化率の推移を**図-4** に，L-LCC の運航頻度の推移を**図-5** に示す．

図-4 より，着陸料低減率の上昇に応じて，国内主要空港の利用者数は単調減少し，国内地方空港の利用者数は単調増加することが示された．具体的には，国内主要空港では 3284 [人] $(q^C = 4)$から 3207 [人] $(q^C = 0)$と最大 2. 35 [%] の減少，国内主要空港では 502 [人] $(q^C = 4)$から 590 [人] $(q^C = 0)$となり最大 17.5 [%]の増加となった．また，**図-5** より，L-LCC の運航頻度も着陸料低減率の上昇に応じて単調増加し，2.48 [本/日] $(q^C = 4)$から 2.94 [本/日] $(q^C = 0)$と 0.46 [本/日] の増加となった．このとき**図-6** に示すように M-LCC の運航頻度は原則 8 [本/日] を維持しており，M-FSC の運航頻度は 7.48 [本/日] $(q^C = 4)$から 7.36 [本/日] $(q^C = 0)$と 0.12 [本/日] に減少している．M-FSC のグラフの挙動については後ほど言及する．国内地方空港の空港着陸料の低減に伴い，L-LCC のオペレーションコストが減少したことで LCC 航空会社は L-LCC を増便させる行動を取ったと考えられる．L-LCC の運航頻度が増加することで，そのサービス性が向上した．その結果国内地方空港の利用者数は増加し，利用者が流出した国内主要空港では利用者数が減少したと考えられる．

以上の考察から，**図-4** と**図-5** に示す結果は現実問題と概ね合致していると言えるが，L-LCC の運航頻度の増加幅は最大でも 0.46 [本/日] と，LCC の就航促進の観点ではインパクトはそれほど大きくはならなかった．運航頻度の増加は利用者の平均待ち時間と混雑コストのみに作用し，運賃，移動時間には影響しない．移動時間と移動時間不確実性の面でハンディキャップを持つL-LCCの利用を促進するには，運航頻度の増加のみでは難しい可能性がある．また，LCC航空会社としても上記理由により需要拡大のポテンシャルが小さいことや，各便の着席率を高めることでオペレーションコストを削減する傾向にあることから，L-LCC を増便するインセンティブが小さいと考えられる．なおモデルの構造上，LCC航空会社はL-LCCの需要が増えても運賃を値上げすることができないため，適切な経営戦略を取れていない可能性がある点にも注意されたい．加えて，今回の数値計算ではオペレーションコスト固定費C_l^{Base}の値を外生的に設定しており，航空会社のコスト構造の値が計算結果の精度に影響を与える可能性がある．

次に，着陸料低減時の社会的便益の推移を**図-7** に示す．**図-7** より，地方空港の着陸料低減に応じて社会的便益が増加したことが示された．L-LCC の運航頻度の増加による消費者余剰の増加が，着陸料収入の減収と FSC航空会社の減収による生産者余剰の減少を上回ったと考えられる．着陸料低減率が 12.5 [%]，35 [%]，65 [%]（以降この 3 点を特異点と記す）のとき，社会的便益が大幅に増加する挙動が確認された．これは消費者余剰の解の挙動によ

るものであり，特異点における利用者の効用が極端に大きく増加することが判明した．また，図-5 に示すように，特異点でのみ M-FSC の運航頻度が一時的に増加することが確認できた．L-LCC が一定の運航頻度に達した時，競合する M-FSC が対抗してサービスレベルを引き上げる行動を取った可能性がある．あるいは，本分析では着陸料の値を外生的に変化させることによりモデルの出力値を分析したため，着陸料の微小な変化に対して数値誤差の影響を大きく受けて計算結果にずれが生じた可能性がある．なお，数値計算においては逐次平均法 (MSA) による配分計算を行っている．そのため，均衡解の精度が高い他の解法を用いた分析をすることで，モデルの挙動が変化する可能性がある．

5. まとめ

本研究では，利用者属性の異質性と航空輸送の移動時間の不確実性を考慮した航空市場分析モデルを提案した．その上で，数値計算として LCC 国際線の地方空港への就航が，ネットワークに与える影響について分析し，モデルの検証を行った．

モデルの構築においては，空港事業者，航空会社，利用者の 3 者を想定して定式化を行った．利用者の効用関数については，ビジネス・観光利用者で異なるパラメータで定義することで差別化を行なった．移動時間の項については，航空輸送に関して移動時間信頼性の概念を導入することで移動時間不確実性を考慮したモデルとし，FSC と LCC の差別化を行なった．また，経路交通量を変数とした混雑コスト関数を定義することで，空港混雑を考慮した利用者均衡配分を変分不等式問題として定式化した．数値計算では，LCC 国際線が国内地方空港に就航する・就航しない場合の 2 ケースにおいて利用者の行動，モデルの挙動を確認した．

本研究では航空路線の運賃は普通運賃として固定し，航空会社は運行頻度を変数として利潤最大化をすると仮定している．そのため，航空会社間の価格競争の表現ができていない．より現実的なモデルにするためには，航空会社の制御変数に運賃を追加した上で，上記に記すような運賃の不確実性を考慮したモデルにすることが必要である．また，今回は OD 需要（交通量）を一定として数値計算を行っているが，本研究で議論している主要空港の混雑・地方空港への誘客促進は，国外航空市場の拡大による需要の増加を背景としたものである．そのため，需要の増加の要因である，利用者の所得やネットワーク内の消費者余剰の変化に応じて OD 需要が変動するようなモデルであることが好ましい．具体的な手法としては，例えば逆需要関数を用いることで，OD 需要を利用者効用の関数にする手法などが考えられる．国内地方空港の着陸料低減の効果についても，消費者余剰及び M-FSC の運航頻度の結果に特徴的な挙動が見られたため，より詳細な分析を実施する必要がある．具体策として，逐次平均法以外の解法を使用した解析の実施や，空港着陸料を摂動パラメータとした，勾配法を用いた感度分析の実施などが挙げられる．Tobin et al.[12]，Yang et al.[13]では，非線形交通量配分問題における感度分析の理論を提案している．上記理論を導入した分析を行うことで，より高精度な均衡解の算出とモデルの解析的な評価が可能となる．

REFERENCES

1) 国土交通省：令和 5 年版国土交通白書 第 II 部 国土交通行政の動向 第 6 章 競争力のある経済社会の構築, https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r03/hakusho/r04/pdf/np206000.pdf (閲覧日 2023.9.17).
2) 芦谷雄世．“高速鉄道と航空会社の協力関係が社会的便益に与える影響”．令和元年度北海道大学卒業論文.
3) Tani, Ryuichi, et al. "Analysis of the effect of bundled airport privatization on an airline network." Transport Policy 124 (2022): 203-211.
4) Takebayashi, Mikio. "Managing the multiple airport system by coordinating short/long-haul flights." Journal of Air Transport Management 22 (2012): 16-20.
5) Takebayashi, Mikio. "How could the collaboration between airport and high speed rail affect the market?." Transportation Research Part A: Policy and Practice 92 (2016): 277-286
6) Wan，Yulai，Changmin Jiang，and Anming Zhang．"Airport congestion pricing and terminal．investment: Effects of terminal. Congestion, passenger types, and concessions." Transportation Research Part B: Methodological. 82 (2015): 91-113.
7) Kawakita, Takuya, Enoch Lee, and Yue Huai, "Scheduling under coopetition of air transport and high-speed railway market under travel time uncertainty and equilibrium conditions. " 26th ATRS World Conference in Kobe, Japan, in July 1st (Sat)-July 4th (Tue), 2023.
8) Xia, Wenyi, and Anming Zhang. "High-speed rail and air transport competition and cooperation: A vertical differentiation approach." Transportation Research Part B: Methodological 94 (2016): 456-481.
9) Su, Min, et al. "The competition effects of low-cost carriers and high-speed rail on the Chinese aviation market." Transport Policy 95 (2020): 37-46.
10) Kuljanin, Jovana, et al. "The effect of LCC market entry on dominant FSC's price into long haul sector: A case of Norwegian competition on British Airways' prices on selected transatlantic routes." Journal of Air Transport Management 91 (2021): 102016.
11) Inoue, Gaku, et al. "Stated-preference analysis to estimate the domestic transport demand following the future entry of LCCs and the inauguration of the Linear Chuo Shinkansen in Japan." Journal of Air Transport Management 47 (2015): 199-217.

12) Tobin, Roger L., and Terry L. Friesz. "Sensitivity analysis for equilibrium network flow." Transportation Science 22.4 (1988): 242-250.
13) Yang, Hai, and Michael GH Bell. "Sensitivity analysis of network traffic equilibrium revisited: the corrected approach." 4th IMA International Conference on Mathematics in TransportInstitute of Mathematics and its Applications. 2007.

(Received ?)

AIRLINE MARKET ANALYSIS MODEL BASED ON A MULTI-CLASS EQUILIBRIUM PASSENGER ASSIGNMENT

Kensuke KAGAMI, Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

In recent years, there has been a remarkable development of the airline market in the Asian region due to the entry of Low-Cost-Carrier (LCC). FSC (Full-Service-Carrier) and LCC differ in terms of uncertainty of travel time such as delay risk. Therefore, it is considered that users' selection behavior changes depending on the purpose of travel. In this study, we propose an airline market analysis model that takes into account multiple user attributes and travel time uncertainty of air transportation. We also confirm the behavior of the model by numerically evaluating the changes in the number of airport users, corporate profits, and social benefits before and after the launch of new international. LCC flights to local airports in Japan. In the formulation, we distinguish between FSC and LCC as airlines, and business and sightseeing as users' purposes of travel. The former is differentiated by exogenously providing the mean and standard deviation of travel time for air transportation. The latter is a multi-class equilibrium allocation by assigning different time values and travel time reliability values depending on the purpose of travel.