

# 旅客の意思決定を考慮した空港容量拡張計画の最適化

Optimizing Airport Capacity Expansion Planning Considering Passenger Decision Making

北海道大学工学部

北海道大学大学院工学院

北海道大学大学院工学研究院

北海道大学大学院工学研究院

○学生員 宮島 済(Satoru Miyajima)

学生員 新田 翔(Sho Nitta)

正 員 嶋 龍一(Ryuichi Tani)

正 員 内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

## 1. はじめに

日本において新型コロナウイルスの感染拡大前の2019年まで旅客航空需要は国際線、国内線ともに増加傾向であった。感染拡大後は旅客航空需要が大きく落ち込んだが、パンデミックの終息後には旅客需要は再び増加傾向に戻る可能性がある。航空需要の増加や、より多様な航空ニーズに対応するためには空港を発着できる航空便の数を増やす必要がある。発着可能な航空便の数を増大させるためには滑走路や誘導路を増やすなど空港容量の拡張が必要となる。また、空港容量は航空会社が決定する航空便の数や旅客の交通手段選択行動に影響を与えるため空港運営会社の利潤にも関係している。従って、空港運営会社の利潤を最大化するような空港容量拡張のための適切な計画の立案が求められている。

交通ネットワークの容量拡張を扱う研究として、Lai and Shih(2013)<sup>2)</sup>は、北米の貨物鉄道ネットワークを対象として、将来需要の不確実性を考慮した長期間にわたる容量拡張のリスクを最小化するための設備投資の時期や順序を決定するための確率的多期間投資選択モデルを提案している。しかし、このモデルは分析対象が貨物鉄道ネットワークであるため、旅客を伴う航空施設に適用するには改良の余地がある。Sun and Schonfeld(2015)<sup>3)</sup>は空港施設の混雑による遅延を考慮した空港容量拡張モデルを提案している。このモデルでは空港運営会社の容量拡張への投資行動にのみ焦点が当てられている。そのため、旅客の交通手段選択行動が考慮されていない。そこで、本研究では航空会社の利潤最大化行動および旅客の交通手段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に、空港の容量拡張計画を立案するためのモデルを提案する。

## 2. モデルの概要

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3者を想定する。また、3者に対してはそれぞれ以下の仮定を適用する。

- 旅客は自らの効用を最大化するように交通手段を選択する。
- 航空会社は自らの利潤を最大化するように航空便の運行頻度を決定する。
- 空港運営会社は自らの利潤を最大化するように着陸料と空港容量拡張計画を決定する。

また、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という関係がある。航空会

社と空港運営会社の間には、空港運営会社は空港の容量と着陸料を決定し、それに応じて航空会社が航空便の運航頻度を決定するという関係がある。また、航空会社は航空便を着陸させる度に空港運営会社に対して着陸料を支払っている。そのため、十分な需要が見込まれる場合には空港運営会社は空港容量を増やせば増やすほど航空会社の航空便の運行頻度が増加するため、着陸料による収入が増加し、空港運営会社の利潤が増えるという関係がある。空港容量については空港運営会社が得る着陸料から運営にかかるコストを引いた利潤の中から投資を行い、拡張を行う。

本研究で提案するモデルでは、初期値として任意の空港容量の値と航空路*i*における航空機の運航頻度や運賃、着陸料を設定し、以下のサイクルで計算を行う。

1. 旅客が交通手段を選択する。航空路を選択した旅客は航空会社に運賃を支払う。
2. 航空会社が運賃の一部を着陸料として空港運営会社に支払う。
3. 空港運営会社が得た利潤の一部から空港容量拡張への投資を行うことで、空港容量を変更する。
4. 空港容量の変化に伴って航空会社が航空機の運航頻度を変化させる。

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容量拡張への投資を必ず行うこととする。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空港容量拡張計画を最適化する。

## 3. モデルの定式化

まず、モデルを定式化するにあたって、ある時点*t*における航空路*i*の容量について定式化を行う。この定式化についてはSun and Schonfeld(2015)<sup>3)</sup>を基とする。それから旅客の交通手段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 (2021)<sup>4)</sup>で行われており、本研究はそれを基とする。このモデルでは各航空路*i* ∈ *I*について、*s*(*i*)から*r*(*i*)に移動する際に利用可能なすべての輸送モードを表す複合輸送モード*o*が存在し、少なくとも1つの航空会社が存在するものとする。

### 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。

|                     |                                                                                                |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I$                 | 航空路 $i$ の集合                                                                                    |
| $M$                 | 輸送モードの集合( $a$ :航空路、 $o$ :航空路以外)                                                                |
| $C_m$               | 輸送モード $m \in M$ に対してサービスを提供する輸送会社の集合                                                           |
| $T$                 | 時点0から $k$ までの計画期間に含まれる時点の集合                                                                    |
| $J$                 | 容量拡張工事のオプション $j$ の集合                                                                           |
| $r(i)$              | 航空路 $i \in I$ の起点ノード(または空港)                                                                    |
| $s(i)$              | 航空路 $i \in I$ の目的地ノード(または空港)                                                                   |
| $x_{i,t}$           | 時点 $t \in T$ における航空路 $i \in I$ の容量                                                             |
| $p_{i,t}$           | 時点 $t \in T$ において旅客がある航空路 $i$ を選択する確率                                                          |
| $s_{i,t}$           | 時点 $t \in T$ において航空路 $i \in I$ における包括的成本                                                       |
| $g_{i,n,t}$         | 旅客が時点 $t \in T$ において航空会社 $n \in C_a$ が運航する航空便を航空路 $i \in I$ で利用するための一般化コスト                     |
| $\lambda$           | $0 < \lambda < 1$ の値を取るパラメータ                                                                   |
| $f_{i,n,t}$         | 時点 $t \in T$ において航空会社 $n \in C_a$ が運航する航空路 $i$ の運賃                                             |
| $u_{i,n,t}$         | 時点 $t \in T$ において航空会社 $n \in C_a$ が設定した航空路 $i \in I$ の運行頻度                                     |
| $\delta_{i,t}^n$    | 時点 $t \in T$ において航空会社 $n \in C_a$ が航空路 $i \in I$ を運航している場合は1、そうでない場合は0となる変数                    |
| $\pi_{n,t}$         | 時点 $t \in T$ における航空会社 $n \in C_a$ の利潤                                                          |
| $q_{i,n,t}$         | 時点 $t \in T$ において起点ノード $r(i)$ から目的地ノード $s(i)$ まで、航空会社 $n \in C_a$ の輸送モード $a$ を利用して移動することに対する需要 |
| $c_{n,t}$           | 時点 $t \in T$ における航空会社 $n \in C_a$ の運営コスト                                                       |
| $\pi$               | 空港運営会社の利潤                                                                                      |
| $\delta_{s(i),t}^s$ | 時点 $t \in T$ 内の航空路 $i \in I$ において、目的地ノード $s(i)$ が空港の場合は1、そうでない場合は0となる変数                        |
| $l_t$               | 時点 $t \in T$ において空港に航空機が着陸するために必要な着陸料                                                          |
| $c_t$               | 時点 $t \in T$ における空港運営会社の運営コスト                                                                  |
| $\theta_{n,t}$      | 時点 $t \in T$ において目的地空港の混雑度によって発生する航空会社 $n$ の追加コスト                                              |
| $\eta$              | 補正パラメータ                                                                                        |
| $z_{j,t}$           | 時点 $t \in T$ において容量拡張工事オプション $j$ を行う場合は1、そうでない場合は0となる変数                                        |
| $h_j$               | 容量拡張工事オプション $j$ を行うために必要なコスト                                                                   |
| $B_t$               | 時点 $t \in T$ で空港が容量拡張工事に使用可能な資金                                                                |
| $\gamma_{j,t}$      | 時点 $t \in T$ において容量拡張オプション $j$ を行った場合に増加する空港容量                                                 |
| $\beta_i$           | 航空路 $i \in I$ において容量拡張オプション $j$ を行うことで増加した空港容量 $\gamma_{j,t}$ を各航空路に振り分けるパラメータ                 |

### 3.2 航空容量の定式化

時点 $t$ における航空路 $i$ の容量 $x_{i,t}$ は、時点 $(t-1)$ における航空路 $i$ の容量に時点 $t$ で増加した容量 $y_{i,t}$ を足すことで求められる。よって $x_{i,t}$ は式(1)に表せる。

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + y_{i,t} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (1)$$

where

$$y_{i,t} = \beta_i \cdot z_{j,t} \cdot \gamma_{j,t} \quad (2)$$

### 3.3 空港運営会社の利潤最大化問題

本研究では空港1つにつき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。なお、本研究では空港運営会社は着陸料のみから収入を得ていると仮定し、着陸料以外に空港運営会社が得る非航空収入は考慮しない。また、着陸料については、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ると仮定する。この仮定から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る。空港運営会社の利潤最大化問題は次のように表される。

$$\max(\pi(l_t, z_{j,t})) = \max \left( \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in C_a} \delta_{s(i),t}^s \cdot u_{i,n,t} \cdot l_t - \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (c_t + h_j \cdot z_{j,t}) \right) \quad (3)$$

where

$$l = (l_1, \dots, l_t, \dots, l_T) \quad (4)$$

$$\sum_{t \in T} z_{j,t} \leq 1 \quad (5)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} h_j \cdot z_{j,t} \leq \sum_{t \in T} B_t \quad (6)$$

$$z = (z_{1,1}, \dots, z_{j,t}, \dots, z_{j,T}) \quad (7)$$

上式において $i$ は $\delta_{s(i),t}^s = 1$ となるような航空路であり、(5)式より各工事オプションを行うのは $T$ 全体において1回のみである。

### 3.4 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航空機の運航頻度を決定する。航空機の座席数や着陸料は与件の定数とする。時点 $t$ における航空会社 $n$ の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。

$$\max(\pi_{n,t}(u_{i,n,t})) = \max \left( \sum_{i \in I} f_{i,n,t} \cdot q_{i,n,t} - c_{n,t}(u) \right) \quad \forall n \in N, t \in T \quad (8)$$

where

$$u = (u_1, \dots, u_{|I|C_a|}, \dots, u_{|I|}, \dots, u_{|I|C_a|}) \quad (9)$$

$$c_{n,t}(u) = \sum_{i \in I} u_{i,n,t} \cdot l_t + \theta_{n,t}(u) \quad \forall n \in N, t \in T \quad (10)$$

$$\theta_{n,t}(u) = \sum_{i \in I} \eta_1 \cdot \delta_{i,t}^n \cdot \exp \left( \eta_2 \cdot \frac{\sum_{i \in I} \sum_{n \in C_a} u_{i,n,t}}{x_{i,t}} \right) \quad \forall n \in N, t \in T \quad (11)$$

United Nations(2019) <sup>6)</sup>によると、航空会社 $n$ のコスト $c_{n,t}(u)$ は、運航頻度で重み付けされた着陸料と、目的地

空港の混雑によって発生する追加コスト $\theta_{n,t}(\mathbf{u})$ の合計として与えられる。また、本研究では航空会社は運航頻度のみを決定し、航空路 $i$ の容量と運賃は外生的に与えられる定数とする。

### 3.5 旅客の交通手段選択行動

本研究では旅客の交通手段選択行動はロジットモデルで表現されると仮定する。また、各航空路線の起点ノードと目的地ノードを結ぶ、鉄道やバスなどの非航空モードが存在すると仮定する。航空路 $i$ に対応する非航空モードの運賃は、Takebayashi and Kuroda (2007)<sup>5)</sup>に倣い、定数として表現する。このような非航空系の輸送モードは、本研究では複合輸送モード $o$ で示される。

はじめに、旅客が時点 $t$ において航空会社 $n$ が運航する航空便を航空路 $i$ で利用するための一般化コスト $g_{i,n,t}$ と、輸送モード $o$ を利用するためのコスト $\hat{g}_{i,t}$ は、それぞれ次のように与えられる。

$$g_{i,n,t} = \begin{cases} f_{i,n,t} + \frac{\alpha_{i,t}}{u_{i,n,t}} & \text{if } \delta_{i,t}^n = 1 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall n \in N, i \in I, t \in T \quad (12)$$

$$\hat{g}_{i,t} = \text{const} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (13)$$

(7)式から一般化コストは運賃と運航頻度に関する時間的コストで構成されている。また、(7)式における $\alpha$ は旅客が航空便を利用するまでに航空便を待つ時間に関するパラメータであり、本研究では航空路の容量の逆数として次のように定義する。

$$\alpha_{i,t} = \frac{1}{x_{i,t}} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (14)$$

また、一般化コストに多変量誤差分布に従う認知誤差 $\epsilon = (\epsilon_1, \dots, \epsilon_{|C_m|})$ を加えることで、ランダム効用理論に基づいて、交通手段の選択確率と航空会社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。

$$f(\epsilon) = \exp \left( - \sum_{m \in M} \left( \sum_{n \in C_m} \exp \left( - \frac{\epsilon_n}{\lambda} \right)^\lambda \right) \right) \quad (15)$$

ここで、 $0 < \lambda < 1$ を満たすパラメータ $\lambda$ を用いることで時点 $t$ における旅客が航空路 $i$ を選択する確率は次のように表される。

$$p_{i,t} = \frac{\exp(-s_{i,t})}{\exp(-s_{i,t}) + \exp(-\hat{g}_{i,t})} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (16)$$

where

$$s_{i,t} = -\lambda \cdot \ln \sum_{n \in C_a} \exp \left( - \frac{g_{i,n,t}}{\lambda} \right) \quad \forall i \in I, t \in T \quad (17)$$

### 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需要変化を設定して計算を行う。まず、初期状態として時点 $t = 0$ における航空路 $i$ の容量 $x_{i,0}$ 、運賃 $f_{i,n,0}$ 、着陸料 $l_0$ を設定し、さらに空港運営会社の初期状態での資金 $B_0$ 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

本研究では空港運営会社が利潤を最大化するように、空港の容量拡張計画を最適化するためのモデルを提案した。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空港運営会社が1社で複数の空港を運営した場合の定式化や空港運営会社の空港容量拡張の投資に関して、投資した金額と拡張可能な容量の関係についてのより詳細な定式化を行うことなどが挙げられる。

### 6. 参考資料

- 1) 国土交通省：観光白書令和3年版 URL：  
<https://www.mlit.go.jp/statistics/file000008.html> (参照日：2021年11月10日)
- 2) Yung-Cheng Lai, Mei-Cheng Shih: A stochastic multi-period investment selection model to optimize strategic railway capacity planning. Advanced Transportation 47 (2013) 281-296
- 3) Yanshuo Sun, Paul Schonfeld: Stochastic capacity expansion models for airport facilities. Transportation Research Part B 80 (2015) 1-18
- 4) Ryuichi Tani, Ibuki Takashima, Teppei kato, Toru Tamura, Kenetsu Uchida: Analysis of the effect of bundled airport privatization on an airline network. Transport Policy (2021)
- 5) 竹林 幹雄, 黒田 勝彦: ネットワーク均衡分析による関西 3 空港における機能分担に関する考察, 土木計画学研究・論文集 Vol.24 No.3 (2007) 427-436
- 6) United Nations: World Population Prospects 2019: Ten Key Findings. Department of Economic and social Affairs, Population Division. (2019)