

旅客と航空会社の行動を考慮した 空港容量拡張計画

峪 龍一¹・宮島 濟²・内田 賢悦³

¹ 正会員 北海道大学助教 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 (Corresponding Author)

² 非会員 北海道大学 工学部 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)
E-mail: mi_ya_hc@frontier.hokudai.ac.jp

³ 正会員 北海道大学教授 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

本研究では、将来的な航空需要の増加に対応するため、空港容量の拡張計画を決める手法を提案する。容量拡張のために必要な各工事を期毎に実施するとき、空港会社は各工事の実施時期を決定する必要がある。本研究では、空港会社の利潤を最大化するように拡張計画を決めるものと仮定する。このとき、航空会社の利潤最大化行動と旅客の交通手段選択行動を考慮する。旅客は運賃と待ち時間に基づき、交通手段を選択する。このうち、待ち時間には航空会社が決定する運行頻度と、空港の容量に依存する空港内遅れ時間が考慮される。空港の容量が小さい場合、旅客が利用する便が空港内の混雑によって遅延する影響を、空港内遅れ時間によって表現する。したがって、空港会社はより多くの旅客が航空便を選択するような拡張計画を立案することで、航空会社は運航頻度を大きくし、収入を増やすことができる。提案する手法を検証するために、テストネットワークを用いた数値計算を行った。

Key Words: airport capacity, landing fee, mode choice behavior

1. はじめに

我が国における、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、パンデミックが世界的に終息した場合には、旅客の需要が再び増加傾向に戻る可能性がある。将来的な航空需要の増加に対応するため、滑走路や誘導路を増やすといった、空港容量を拡張する必要がある。空港容量が旅客の需要に対してひっ迫すると、航空便が遅延する確率が大きくなり、旅客の交通機関選択あるいは旅行の実施の有無に影響を与える。空港容量のひっ迫による旅客の行動選択は空港会社と航空会社の経営に影響を与える。したがって、空港容量の拡張計画を立案するにあたっては、将来的な旅客の増加傾向を踏まえて、空港会社・航空会社・旅客の行動をモデル化して考慮する必要がある。

そこで本研究では、航空会社および旅客の行動を考慮した、空港の容量拡張計画を決めるためのモデルを提案する。空港内の需給のバランスによって、旅客が経験す

る混雑の度合いが変化する。旅客の需要が空港の容量を上回る場合、混雑が生じて、航空会社による便数を決める判断、および旅客の交通機関を選択する判断に影響を与える。本研究で提案するモデルでは、空港会社が航空会社と旅客の行動を考慮しつつ、利潤を最大化するように、空港容量の拡張計画を決定するものとする。

交通インフラの容量拡張問題を扱った既往研究として、Lai and Shih¹⁾は、北米の貨物鉄道ネットワークを対象として、将来の貨物需要予測の不確実性を考慮した、他機関投資選択モデルを提案している。ここでは、将来需要の不確実性を考慮して、長期間にわたる容量拡張のリスクを最小化するように、設備投資の時期と順序を決定している。Sun and Schonfeld²⁾はこのモデルを空港ネットワークに拡張し、空港内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た。しかし、このモデルでは、空港運営会社の空港容量拡張計画に対する、航空会社および旅客の行動については考慮されていない。本研究の貢献は航空会社と旅客の行動を定式化したうえで、空港会社の容量を拡張するための意思決定を記述した点である。

本稿の構成は以下の通りである。第 2 章では、本モデルにおける仮定、記号、および空港の容量拡張計画モデルを構成する定式化を示す。第 3 章では、簡単な数値計算の結果を示し、提案するモデルの挙動を検証する。第 4 章では、本研究をまとめ、今後の課題を示す。

2. モデル

(1) 概要と仮定

本研究で提案するモデルではステークホルダーと空港運営会社、旅客、航空会社の 3 社を想定する。空港運営会社は空港の容量と着陸料を決定する。航空会社は航空便を着陸させるたびに空港運営会社に対して着陸料を支払う。旅客は交通行動を決定して、運賃を航空会社に支払う。十分な需要が見込まれる場合には、空港運営会社が空港容量を増やすことで、航空会社が決定する航空便の運航頻度が増えるため、空港運営会社の着陸料による収入および利潤が増えることになる。空港運営会社は着陸料による収入から、空港の運営にかかるコストを控除した利潤を、空港容量の拡張のための投資に回す。旅客・航空会社・空港運営会社それぞれの行動を以下のように仮定する。

- ・ 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航頻度を決定する。
- ・ 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。

時点 t における航空路 i の容量は、Sun and Schonfeld²⁾に基づく。旅客の交通手段選択、および航空会社と空港運営会社の行動は、Tani et al.³⁾の定式化に基づく。

(2) 記号

本稿で使用する記号は以下の通りである。

I	航空路 i の集合
M	輸送モードの集合 (α : 航空, σ : 航空以外)
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 の起点ノード (または空港)
$s(i)$	航空路 i の終点ノード (または空港)
$x_{i,t}$	時点 t における航空路 i の容量
$p_{i,t}$	時点 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 において航空路 i における包括的費用
$g_{i,n,t}$	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費用

λ	$0 < \lambda < 1$ の値をとるパラメータ
$f_{i,n,t}$	時点 t において航空会社 n が運航する航空路 i の運賃
$u_{i,n,t}$	時点 t において航空会社 n が設定した航空路 i の運航頻度
$\delta_{i,t}^n$	時点 t において航空会社 n が航空路 i を運航している場合は 1, それ以外は 0 となる変数
$\pi_{n,t}$	時点 t における航空会社 n の利潤
$q_{i,n,t}$	時点 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 の輸送モード a を利用して移動する需要
$c_{n,t}$	時点 t における航空会社 n の運営コスト
π	空港運営会社の利潤
$\delta_{s(i),t}^s$	時点 t の航空路 i において、終点ノード $s(i)$ 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 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 における空港運営会社の運営コスト
$\theta_{n,t}$	時点 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 が負担する費用補正パラメータ
η	
$z_{j,t}$	時点 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	容量拡張の工事オプション j を行うために必要な費用
B_t	時点 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 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
β_i	時点 t 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 $\gamma_{i,t}$ を各航空路に振り分けるパラメータ
$\alpha_{i,t}$	時点 t 内の航空路 i において、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

(3) 空港容量

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。

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

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

本研究では航空路の容量 $x_{i,t}$ と $y_{i,t}$, $\gamma_{j,t}$ の単位は時点 t あたりの航空機の発着回数とする。

(3) 空港運営会社

本研究では空港 1 つにつき、1 つの空港運営会社が存

在して、運営されるものとする。空港運営会社は着陸料のみから収入を得るものと仮定し、着陸料以外に空港運営会社から得る収入（例えば、非航空収入）は考慮しない。空港運営会社は自らの利潤を最大化するように、着陸料を自由に決めるものとする。空港運営会社の利潤最大化行動は以下の問題を解くことで表現される。

$$\max \pi(\mathbf{l}, \mathbf{z}) \quad (3)$$

where

$$\mathbf{l} = (l_1, \dots, l_t, \dots, l_T)^T \quad (4)$$

$$\mathbf{z} = (\mathbf{z}_1^T, \dots, \mathbf{z}_t^T, \dots, \mathbf{z}_T^T)^T \quad (5)$$

$$\mathbf{z}_t = (z_{1,t}, \dots, z_{j,t}, \dots, z_{J,t})^T \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$\pi(\mathbf{l}, \mathbf{z}) \quad (7)$$

$$= \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{n \in C_a} \delta_{s(i),t}^{\sim s} \cdot u_{i,n,t} \cdot l_t - \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (c_t + h_j \cdot z_{j,t}) \quad (8)$$

$$\sum_{t \in T} z_{j,t} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (8)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} h_j \cdot z_{j,t} \leq \sum_{t \in T} B_t \quad (9)$$

(4)-(6)において、上添え字 T は転置を表す。(7)より、空港運営会社の利潤は、 $\delta_{s(i),t}^{\sim s} = 1$ となる航空路から得られる着陸料収入から空港を運営する費用および容量拡張にかかる費用を控除して定義される。(8)より、容量拡張の工事オプション j は、期間 T 全体において、1 回のみ実施される。(9)より、空港運営会社は時点 t において、保有する資金を超える金額の容量拡張の工事オプションを実施できない。

(4) 航空会社

航空会社は自らの利潤を最大化するように、各航空路における運航頻度を決定する。機材の座席数は与件とする。着陸料は、以下に示す航空会社の利潤最大化問題においては、外生的に与えられるものとする。時点 t における航空会社 n の利潤最大化問題は次のように表される。

$$\max \pi_{n,t}(\mathbf{u}_{n,t}) \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (10)$$

where

$$\mathbf{u}_{n,t} = (u_{1,n,t}, \dots, u_{i,n,t}, \dots, u_{I,n,t})^T \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\pi_{n,t}(\mathbf{u}_{n,t}) = \sum_{i \in I} f_{i,n,t} \cdot q_{i,n,t} - c_{n,t}(\mathbf{u}_{n,t}) \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (12)$$

$$c_{n,t}(\mathbf{u}_{n,t}) = \sum_{i \in I} u_{i,n,t} \cdot l_t + \theta_{n,t}(\mathbf{u}_{n,t}) \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\theta_{n,t}(\mathbf{u}_{n,t}) = \sum_{i \in I} \eta_1 \cdot \delta_{i,t}^n \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (14)$$

$$\cdot \exp\left(\eta_2 \cdot \frac{\sum_{i \in I} \sum_{n \in C_a} u_{i,n,t}}{x_{i,t}}\right)$$

$$\forall n \in N, \forall t \in T$$

(12)より、航空会社の利潤は運賃と航空需要の積として

計算される収入から、航空会社の運営費用を控除して得られる。(13)より、航空会社の運営費用は航空機の運航頻度と着陸料の積として計算される支払額と、航空会社が負担する混雑費用の和として計算される。(14)における航空会社が負担する混雑費用とは、目的地の空港の混雑によって発生する追加的な費用として解釈する。(14)より、航空会社が負担する混雑費用は、航空路の容量を運航頻度が上回るほど大きくなることわかる。また、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ものとする。

(5) 旅客の交通手段選択

本研究では旅客は交通手段として、航空モード a と非航空モード o のどちらかを選択するものと仮定する。つまり、いずれの航空路においても、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、竹林ら⁴⁾にならない定数とする。

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 で利用するときの一般化費用 $g_{i,n,t}$ と輸送モード o を利用するときの一般化費用 $\hat{g}_{i,t}$ はそれぞれ次のように与えられる。

$$g_{i,n,t} = \begin{cases} f_{i,n,t} + \frac{\alpha_{i,t}}{u_{i,n,t}} & \text{if } \delta_{i,t}^n = 1 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

$$\forall n \in N, \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$\hat{g}_{i,t} = \text{const.} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (16)$$

(15)において、一般化費用は航空便の運賃と航空便の運航頻度の逆数である平均待ち時間の和として考える。

(16)において、 $\alpha_{i,t}$ は旅客が次に搭乗する航空便を待つ時間に対応するパラメータである。 $\alpha_{i,t}$ は航空路の容量の逆数を補正して以下のように定義する。

$$\alpha_{i,t} = \frac{\alpha}{x_{i,t}} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (17)$$

(15), (16)に示す一般化費用に多変量の誤差分布を認知誤差として付加して、ランダム効用理論に基づき、交通機関選択確率を定義する。誤差分布の分布関数は以下の通りである。

$$f(\varepsilon) = \exp\left(-\sum_{m \in M} \sum_{n \in C_m} \exp\left(-\frac{\varepsilon_n}{\lambda}\right)^\lambda\right) \quad (18)$$

ここで、 λ は $0 < \lambda < 1$ を満たす、誤差分布のスケールパラメータである。時点 t における旅客が航空路 i を選択する確率は以下の通りである。

$$p_{i,t} = \frac{\exp(-s_{i,t})}{\exp(-s_{i,t}) + \exp(-\hat{g}_{i,t})} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (19)$$

where

$$s_{i,t} = -\lambda \cdot \ln \left(\sum_{n \in C_a} \exp \left(-\frac{g_{i,n,t}}{\lambda} \right) \right) \quad (20)$$

$\forall i \in I, \forall t \in T$

3. 数値計算

(1) 設定

数値計算にあたり、航空会社は1社、航空路は1つとする。期間は5年間とする。その他、設定した各種パラメータを表7に示す。

変数	値
$x_{1,1}$	6,000[回/年]
$q_{1,1,1}$	4500[人/日]
$y_{1,1}$	0[回/年]
$f_{1,1}$	20,000[円]
$u_{1,1,1}$	5,000[回/年]
l	150,000[円]
c_t	7[億円]
B_1	0[円]

工事オプションの設定を表2に示す。工事期間と同じ、5種類の工事オプションを設定する。各工事オプションを実施するごとに空港容量が線形に増加するものとする。

	空港容量の増分[回]	費用[億円]
1	100	1
2	150	2.1
3	400	2.5
4	800	3
5	0	0

交通需要が増加するシナリオは表3の通りである。

時点 t	交通需要 $q_{1,1,t}$ [人/日]
1	4500
2	4950
3	5940
4	6534
5	7841

(2) 結果

(1)の設定の下、提案する空港運営会社の利潤最大化問題を解いた結果を示す。表4は5,1,2,3,4の順番で工事オプションを実施した場合の結果を示す。表5は工事オプションの順番について最適化を行った場合の結果を示す。

す。

表4 工事オプションの順番と利潤 (最適化なし)

時点 t	工事オプション	時点 t の利潤[円]
1	5	50,000,000
2	1	25,234,000
3	2	83,426,000
4	3	139,645,000
5	4	38,689,000
合計		336,994,000

表5 工事オプションの順番と利潤 (最適化あり)

時点 t	工事オプション	時点 t の利潤[円]
1	5	50,000,000
2	1	25,234,000
3	3	41,243,000
4	4	88,513,000
5	2	184,851,000
合計		389,841,000

表4-5より、全期間において、実施した工事オプションの種類と数は等しいものの、最適化ありの場合における、最終的な利潤の合計は最適化なしの場合と比べて、約16%大きいことがわかる。

図1に各時点 t における、累積された利潤の推移を示す。最適化ありのケースでは、早い時点において、航空路の容量がより大きくなる工事オプションを実施している。工事オプションにかかる費用が大きいため、早い時点における利潤は小さいものの、最終的な累積された利潤は、最適化なしの場合と比べて大きくなった。

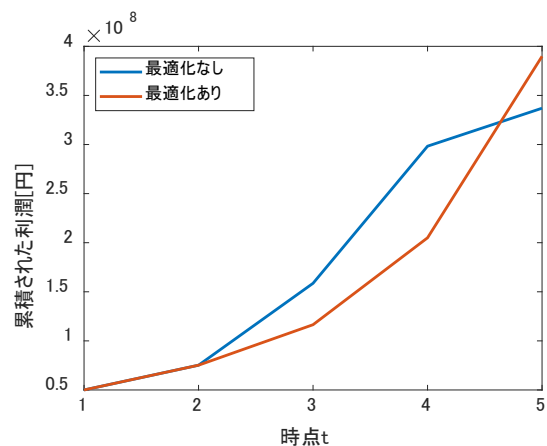


図1 累積された利潤の推移

4. まとめ

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。数値計算では、容量拡張工事を実施する順番を入れ替えることで、空港運営会社の利潤の総和が増加する例を示した。

本研究では、運賃は所与としているが、需給に応じた、運賃の変動を考慮することは今後の課題である。また、一つの空港運営会社が複数の空港を運営する場合の空港運営会社の行動を考慮することも今後の課題である。

本研究では、空港容量が追加的な工事オプションに依らず、線形に増加することを仮定している。現実の空港容量と工事オプションの関係を鑑みると強い仮定である。現実には、空港容量のボトルネックを規定する設備が存在するはずである。需要の増加に応じて、空港容量を規定するボトルネックを段階的に拡張させる空港の運営計画を立案するためのモデルの開発が必要である。

REFERENCES

- 1) Lai, Y. and Shih, M.: A stochastic multi-period investment selection model to optimize strategic railway capacity, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 47, No. 3, pp. 281-296, 2013.
- 2) Sun, Y. and Schonfeld, P.: Stochastic capacity expansion models for airport facilities, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 80, pp. 1-18, 2015.
- 3) Tani, R., Takashima, I., Kato, T. and Uchida, K.: Analysis of the effect of bundled airport privatization on an airline network, *Transport Policy*, Vol. 124, pp. 203-211, 2022.
- 4) 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, pp. 427-436, 2007.

(?)

Airport capacity expansion planning considering the behaviors of passengers and airlines

Ryuichi TANI, Satoru MIYAJIMA, and Kenetsu UCHIDA

This study proposes a method to determine the airport capacity expansion plan to accommodate future increases in airline demand. The airport company needs to determine the timing of each construction project when each project is to be done within a certain period. This study assumes that the expansion planning is determined to maximize the airport company's profit. The profit maximization behavior of the airline company and the transportation mode choice behavior of the passengers are also considered. Passengers choose their mode of transportation based on fare and waiting time. The waiting time considers the airline frequency determined by the airline company and the delay time at the airport. The delay time reflects the congestion at the airport and depends on the airport's capacity. Therefore, the airport company determines the expansion planning, which enables more potential passengers to choose airlines, and the airline companies can make more revenue. Numerical calculations with a test network were performed to validate the proposed method.