

滑走路容量の影響を考慮した航空会社の機材選択・ネットワーク形成に関する研究：
羽田空港を対象として*

Airlines' Behavior on Choice of Aircraft Size and Network Design under Runway Capacity
Constraint: Application to Haneda Airport

竹林幹雄**

by Mikio TAKEBAYASHI

1. はじめに

羽田空港（以下 HND）での第 4 滑走路供用がいよいよ 2010 年秋に実施され、わが国最大の空港での発着数が大きく増加することとなる。この発着数の大幅増は、HND での一部国際化など、多様なサービス提供をもたらすものと期待される。特に、欧米では当たり前のこととなっている single aisle の機材（主として B737 や A320 系）での多頻度運航が、この滑走路容量制約の大幅緩和により実現する可能性がある。新千歳や福岡、大阪といった HND 利用の需要の 40% 以上を占める幹線でのサービスは、現在 B777/747 を中心とした世界でも類を見ない大型機の発着する路線であり、HND の拡張に際して、single aisle 機材や時期世代機の主力である中型 two aisles 機による多頻度運航による利用者の便益向上が期待される。現在までに、航空各社をはじめとして各方面から将来的な機材サイズならびに需要についての予測がなされているが、滑走路容量制約の緩和を理論的に明示した議論がなされているとはいえない。

筆者は昨年秋大会（第 38 回大会）にて、滑走路容量制約と航空会社の機材サイズを選択について bi-level モデルを拡張したモデルを提案し、数値計算を通じて分析を行った¹⁾が、あくまでも理論的な考察にとどまるものであった。今回は提案したモデルを用いて、HND における容量制約緩和が幹線のネットワークデザインに与える影響について考察する。

*キーワード: 羽田空港, 滑走路容量, 機材選択

**：正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

Email: takebaya@kobe-u.ac.jp

2. モデル

ここで用いるモデルは、既発表の離散変数を含む Bi-Level モデル¹⁾²⁾である。上位問題に機材サイズならびに輸送能力を制御変数とするネットワーク航空会社間の競争、下位問題に均衡制約として旅客の最適化行動を組み込むものである。

(1) 旅客行動

旅客行動は座席数制約を明示的に考慮した確率的利用者均衡状態を仮定している。

$$\text{Object: } \Gamma(x_k^{rs}) = \frac{1}{\theta} \sum_{rs \in \Omega} \sum_{k \in K^{rs}} x_k^{rs} (\ln x_k^{rs} - 1) + \sum_{rs \in \Omega} \sum_{k \in K^{rs}} u_k^{rs} x_k^{rs} \rightarrow \min \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{k \in K^{rs}} x_k^{rs} = X^{rs}, \text{ for } \forall rs \in \Omega, \quad (2)$$

$$x_{l^n} = \sum_{rs} \sum_k x_k^{rs} \delta_{l^n}^{rsk} \leq v_{l^n} f_{l^n}, \quad (3)$$

, for $\forall l^n \in I^n, \forall n \in N$

$$x_k^{rs} \geq 0, \text{ for } \forall k \in K^{rs}, \forall rs \in \Omega. \quad (4)$$

ここで、 x_k^{rs} を rs OD 市場での第 k 番目経路の旅客数、 X^{rs} を rs OD 市場での総旅客数、 f_{l^n} をリンク l^n の運行頻度、 v_{l^n} をその機材サイズを示すシート数、 K^{rs} を経路候補を表す集合、 N を航空会社の集合を表すものとする。なお、旅客の効用関数は費用、時間、頻度の経済性（輸送頻度の逆数で表される）および混雑で構成されている。

(2) 航空会社の行動

航空会社の行動は既往研究で示したモデルを、機材選択可能なように拡張する必要がある。 π^n を航空会社 n の利潤関数、 \tilde{f}_{l^n} 、 \tilde{v}_{l^n} をライバル

会社 ($-n$ で表記) の行動, I^n, I^{-n} は n およびそのライバル会社の運行するリンクの集合, p_k^{rs}, \hat{x}_k^{rs} , を rs OD 市場における経路 k での運賃 (与件), および均衡経路旅客数, $C_{l^n}^{OP}$ をリンク l^n での 1 回あたりの運行費用, x_{l^n} をリンク旅客数とする. 航空会社 n の直面する利潤最大化行動は, ライバル会社 ($-n$ で表現) の行動を与件として, 以下のように定式化される.

$$\begin{aligned} \text{Object: } & \pi^n(f_{l^n \in I^n}, v_{l^n \in I^n}, \tilde{f}_{l^{-n} \in I^{-n}}, \tilde{v}_{l^{-n} \in I^{-n}}) \\ & = \sum_{rs} \sum_k p_k^{rs} \hat{x}_k^{rs} \delta_n^{rsk} - \sum_{l \in I^n} C_{l^n}^{OP} f_{l^n}, \text{ for } \forall n, \end{aligned} \quad (5)$$

subject to

$$f_{l^n} v_{l^n} \geq x_{l^n} = \sum_{rs} \sum_k \hat{x}_k^{rs} \delta_{l^n}^{rsk}, \text{ for } \forall l^n \in I^n, \quad (6)$$

$$\sum_{l^n} f_{l^n} \delta_h^n \leq F_h, \text{ for } \forall h \in \Xi, \quad (7)$$

$$f_{l^n} \geq f_{LOW}, \text{ for } \forall l^n \in I^n, \quad (8)$$

$$\hat{x}_k^{rs} = \arg\{\min : \Gamma(x_k^{rs}) \text{ subject to constrn.}\}, \text{ for } \forall k \in K^{rs} \text{ and } rs \in \Omega \quad (9)$$

ここで, F_h は空港 h での滑走路容量であり, Γ は旅客行動の均衡を求めるための等価な最適化問題の目的関数である. なお, 既往研究でも述べたとおり, ネットワークの形状変更を禁止するため, リンクの切断を禁止する式(8)を導入している.

(3) 均衡解の導出

均衡解の導出には, 2008 年秋大会で提案した 2 段階のゲーム構造による解法を用いる (竹林, 2008). すなわち, 2 段階競争と仮定し, 第 1 段階で機材サイズ選択, 第 2 段階で頻度決定を行う従来のモデルで示された段階での競争と考えた. なお, このように構成する場合, f を実数, v を整数とした混合整数計画問題の構造を持つことになる点に注意が必要である.

3. HND を中心とした幹線輸送市場への適用

(1) 入力データ

本稿では, 2010 年の HND 滑走路容量拡張による影響を考察する. 分析に先立ち, 利用するデータについて簡単に触れる.

OD 交通量については, 首都圏発着の長距離旅客を対象とし, OD 交通量のパターンは平成 19 年発行の全国幹線旅客純流動調査の全交通モードを用いた. なお, 再現性も含めた対象年度を 2007 年とし, 調査年が 2005 年であるため, 旅客の年率の伸び率を平成 18 年度貨物・旅客地域流動調査による 0.3% として計算に使用した.

航空輸送に関わるデータ (輸送頻度, 機材, 旅客数) は平成 18 年, および 19 年の航空統計年報に掲載された数値を利用した. 1 シート・キロメートルあたりの限界費用算定に際しては, Aviation Week & Space Technology 2009 年版ソースブック³⁾に掲載された financial data の値を参考に Brander and Zhang⁴⁾の算定式を用いて基準値を算定した. さらに, Wenbin and Hansen⁵⁾の実証分析を参考に, 輸送距離帯別機材形式別単位運航費用の比較値を計算に使用した. なお, 本稿では JAL/ANA の複占市場を基本的な分析対象としている.

(2) 再現性

ここでは, 2007 年を対象年とした再現性について述べる. 旅客の効用関数のウェイトに関しては時間に対するウェイトを 1 として, 費用に対するウェイト = 0.74, 頻度の経済性に対するウェイト = 10.1, 分散パラメータ = 0.26 (不効用なので全て負である) を得た⁶⁾. なお, t 値は全て絶対値 2 を超えており, 統計的にも安定である.

次に, ネットワークの再現性について検討する. なお, 機材サイズについては, 詳細に分けると非常に多岐にわたるため, B737 クラス (120 席), B767 クラス (275 席), B777 クラス (400 席) の 3 種類とした. ここでは, HND で設定されている路線のうち, 「幹線」に分類される路線に焦点を当て, 分析を行う. ここで, 関西方面の路線に関しては, 同一地域内に複数空港があり, かつそれらのうち神戸空港路線のみ地方路線に分類され

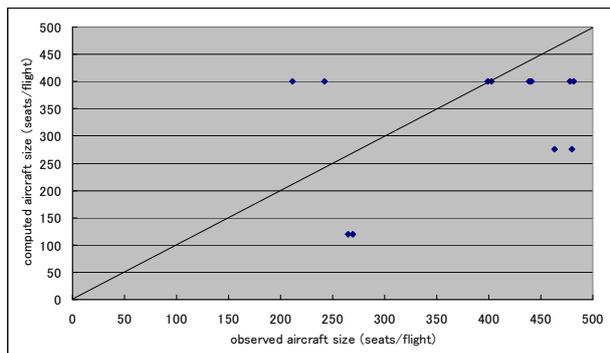


図-1 機材サイズの再現性

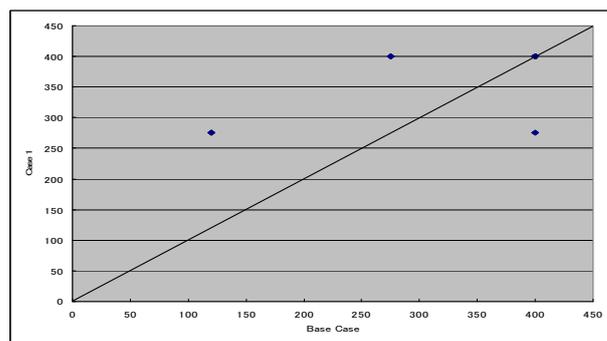


図-3 機材サイズの比較

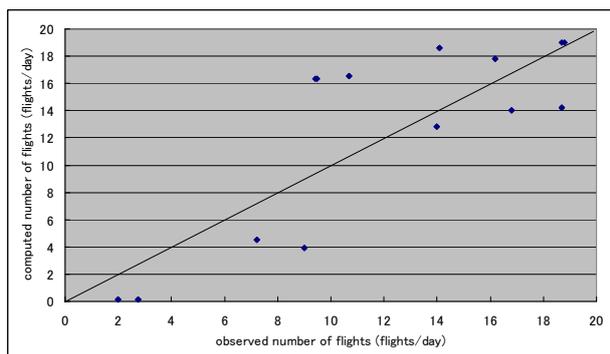


図-2 輸送頻度（片道）の再現性

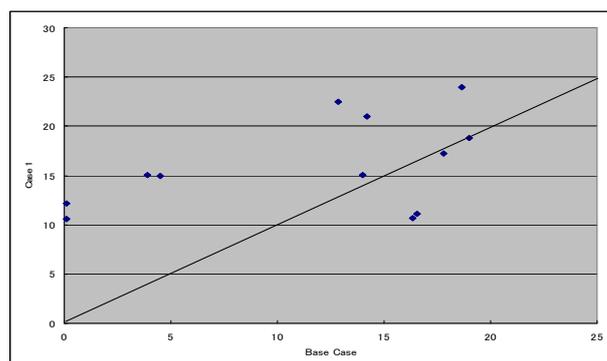


図-4 輸送頻度（往路）の比較

ているが、関西地方の空港選択問題を無視することは需要分析上好ましくないと判断し、神戸空港路線のみ例外的に幹線扱いとして分析対象とした。

図-1 は観測された使用機材（1 路線年平均）と計算結果との比較である。また、図-2 はその頻度に関する比較である。まず、機材サイズの再現性に関しては、多くの路線で過小評価となっている。

関西空港発着路線に関してのみ過大推計となった。これは機材を 3 種類に限定したため、平均座席供用数が 400 席を超える路線が多いため、多くが過小評価となった。しかし、3 種類の機材の中で、多くが最大サイズの路線となったことを考えると、多くの路線で正確な判別を行ったと解釈することもできる。また、図-2 に示される頻度の再現性も、神戸空港発着路線のみ極端に低く評価されることを除けば、 $R=0.83$ 程度となり、おおむね良好な再現性を有しているといえる。

(3) HND 滑走路容量拡張の影響

次に、HND での滑走路容量拡張が航空会社の戦略に与える影響について分析を行う。ここでは計画されている 40% 増加が現在のスロット割り当てに一律に科される場合を基準に分析を行った。結果を図-3~4 に示す。なお、比較は本モデルによる再現を示したものを基準(Base Case)とした。

図-3 から、期待されたダウンサイズが行われるという結果を得たのは 1 路線（JAL：福岡路線）にとどまる。逆にアップサイズが行われる路線は 4 路線（JAL, ANA とも：那覇, 神戸）という結果を得た。神戸空港路線は、HND の滑走路容量制約が非常に厳しいため、Base Case では非常に評価が低くなったものの、HND での滑走路容量が拡大することで、頻度を確保することが可能となり、その分、1 シート・キロメートルあたり最も効率的な機材である B767 クラスに機材サイズがシフトしたものと考えられる。また、那覇路線に関しては、航空会社の寡占市場であり、規模の経済性が働きやすい環境にあると考えられ、大型化が進行したと考えられる。このため、発着回数そのもの

は減少している。逆に、福岡路線は新幹線との競合も影響するため、頻度の経済性が働きやすい環境にあると考えられ、ダウンサイズの上、48%の頻度増加につながったと考えられる。機材あたりの輸送力減少は32%であるため、全体的な輸送効率はコスト削減も含めて改善されている。

さて、輸送頻度については、ほぼ全ての路線で大幅な増便がなされている。割り当てられた発着回数は全て使用されるという結果を得た。ただし、札幌路線のみ、頻度に関してはほとんど変化がない。これは現段階ではほぼ需給がバランスしているためであり、ダウンサイズによる頻度の経済性による効果も期待されないためであると考えられる。

(4) 感度分析

(3)での検討結果は、JAL/ANAでの発着数割り当てが現行の比率を踏襲するという前提のもとに進めたものである。これは現行の地方路線への割り当ても維持されるという前提に立ったものである。しかし、地方路線への割り当てを削減し、幹線の輸送力を厚くする、JAL/ANAへのスロット割り当てを等しくする、LCC導入を促進するなど、様々な可能性が検討できる。ここでは、紙面の都合上、JAL/ANAとも全く同じだけの数の発着数が割り当てられた場合について紹介する(図-5)。その他の場合については講演時に紹介する。

結果としては、JAL/ANAともに同じ滑走路容量としたことにより、JALの福岡路線がアップサイズ化(頻度減少)し、一方JALの那覇路線がダウンサイズ化(頻度増加)した。これは、

- ① 単位運航費用の差により、400席クラスの機材投入によるコスト増加の影響が小さく、結果として滑走路容量の増加分を全て400席クラスの機材投入に当てるといった戦略をとった。
- ② JALはANAの競争力が増加したことにより、より頻度の経済の働きやすい那覇路線を増強するため、機材をダウンサイズ化し、コスト

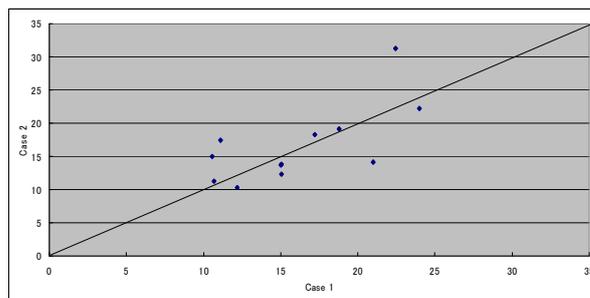


図-5 輸送頻度(往路)の比較

も低下させた。一方で福岡路線での競争力低下により機材サイズを大型化し、頻度の削減を行った(図-5参照)。

と考えられる。このように、競争の枠組みが変化することにより機材サイズの変更が見られる可能性があることが指摘できた。

4. おわりに

本稿では滑走路容量制約と機材選択の関係についてHNDを対象として数値実験を通じて検討を加えた。

参考文献

- 1) 竹林幹雄: 滑走路容量の影響を考慮した航空会社の機材選択・ネットワーク形成に関するモデル分析, 第38回土木計画学研究発表会, 2008.
- 2) Mikio Takebayashi: Airline's behavior for choice of aircraft size and network design: bi-level model, ATRS 2009 Abu Dhabi, 2009.
- 3) Aviation Week & Space Technology, Jan. 26, 2009, McGraw Hill.
- 4) Brander, J.A. and Zhang, A.: Market Conduct in the Airline Industry, RAND Journal of Economics, Vol.21, No.4, 567-583., 1990.
- 5) Wenbin, W. and Hansen, M.: Cost economics of aircraft size. Journal of Transport Economics and Policy 37 (part 2), 277-294, 2003.
- 6) 古川実音: 機材容量制約下における航空旅客の路線選択行動パラメータの推定法, 神戸大学卒業論文, 2008.