

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\*

Modeling of Airlines' Behavior on Choice of Aircraft Size and Network Design under Runway Capacity Constraint

竹林幹雄\*\*

by Mikio TAKEBAYASHI

## 1. はじめに

羽田空港（以下 HND）での第4滑走路供用を2010年に控え、わが国の国内航空輸送市場には大きな変化が生じる可能性がある。代表的なものは、機材のダウンサイジングである。従来、わが国国内航空旅客輸送市場ではおよそ50%がHND発着の需要であるが、滑走路容量の不足が著しく、そのため高需要路線（例えば札幌路線など）でのB747/B777など大型機材(wide body/multi aisle aircraft)投入が行われてきた。自由化・規制緩和が進んだ欧米の航空輸送市場においては、ステージ距離(stage length)が1000km程度の短距離市場を見る限り、投入機材の主軸はあくまでも小型機(narrow body/single aisle)による多頻度輸送であり、このような大型機による短距離輸送は他に類を見ない極めて特殊なパターンであるといえる。

このように、最大需要地であるHNDでのスロット不足（直接的には滑走路容量不足）の改善は、わが国の国内航空輸送市場の状況を大きく変えうるという可能性がある。しかし、こういった現象を理論的に分析した例は、実のところ少ない。航空輸送市場において、機材サイズと頻度、需要の関係を最初に理論的に説明したのはPanzer(1980)であるといつてよいが、彼のモデルでは、単一市場における上記の関係を議論することにとどまる。また、近年ではdemand-supply interactionの視点から、Adler(2001, 2005)が精力的にbi-level市場モデルを開発している。彼女のモデルでは、

機材選択、頻度決定の他に、運賃も航空会社の戦略に組み込まれている。このため、求解が非常に難しいことが問題であった。また2005年の研究では、複数の均衡解の存在を指摘するなど、理論的進展があったが、得られた解に対する理論的検討はほとんどなされていない。また、両者とも、航空会社に対する物理的制約の影響は考察対象外となっている。わが国の状況を考える上で、まず滑走路容量など物理的制約の影響を考察可能な方法論の提供が必要であり、また理論的な見地からはどのような均衡解が得られるのか、均衡解と与えられた条件との関係について議論することが必要であろう。

本稿では、以上のような問題意識に鑑み、航空会社のネットワーク・デザイン戦略を考察する上で、機材選択と滑走路容量制約との関係を検討可能なモデルを構成し、数値計算を通じて、均衡解の特性について検討を加える。

## 2. モデル

ここで用いるモデルでは、既発表のBi-Levelモデル（竹林・黒田, 2006）を拡張し、機材選択を航空会社の戦略に組み込みを可能にした。

基本構造は上位問題に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。なお、航空会社の競争では、2種類の異なる性質を持つ戦略要素を考慮するため、求解過程に工夫が必要である。

### (1) 旅客行動

旅客行動は既往モデル（竹林・黒田, 2006）と全く同様であるため割愛する。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。

---

\*キーワード: 航空旅客輸送市場, 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) 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。  $\pi^n$  を航空会社  $n$  の利潤関数、  $f_{l^n}$  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、  $\tilde{f}_{l^{-n}}$ 、  $\tilde{v}_{l^{-n}}$  をライバル会社の行動、  $I^n$ 、  $I^{-n}$  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  $rsOD$  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。

[航空会社の利潤最大化: AFC]

$$\begin{aligned} \text{Object: } & \pi^n(f_{l^n \in I^n}, v_{l^n \in I^n} \mid \tilde{f}_{l^{-n} \in I^{-n}}, \tilde{v}_{l^{-n} \in I^{-n}}) \\ & = \sum_{rs} \sum_k p_k^{rs} \hat{x}_k^{rs} \delta_n^{rsk} - \sum_{l \in I^n} C_{l^n}^{OP} f_{l^n}, \text{ for } \forall n, \end{aligned} \quad (1)$$

subject to

$$f_{l^n} v_{l^n} \geq x_{l^n} = \sum_{rs} \sum_k \hat{x}_k^{rs} \delta_{l^n}^{rsk}, \text{ for } \forall l^n \in I^n, \quad (2)$$

$$\sum_{l^n} f_{l^n} \delta_h^{l^n} \leq F_h, \text{ for } \forall h \in \Xi, \quad (3)$$

$$f_{l^n} \geq f_{LOW}, \text{ for } \forall l^n \in I^n, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^{rs} = \arg\{\min : \Gamma(x_k^{rs}) \text{ subject to constrn.}\}, \\ \text{for } \forall k \in K^{rs} \text{ and } rs \in \Omega \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、  $F_h$  は空港  $h$  での滑走路容量であり、  $\Gamma$  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(4)を導入している。

## (3) 均衡解の導出

問題 AFC は、2 種類の操作変数を持っている。Adler のモデルと同様の問題であり、同時決定問題として解くことは非常に難しい。しかし、この問題は航空輸送市場特有の現象を考慮することにより、問題規模を縮小することができる。

まず、頻度  $f$  と機材サイズ  $v$  について考えると、  $f$  のバリエーションに比べて、  $v$  のバリエーションははるかに少ないと考えてよい<sup>1</sup>。このため、  $v$  の扱いを工夫することで計算量のダウンサイジングが可能であると考えられる。また  $f$ 、  $v$  ともに整数とする場合、計算規模は膨大になるが、一方を実数とする混合整数計画問題のクラスとすることで、計算量は削減され得る。

以上のような検討から、  $f$  を従来モデルに従い実数、  $v$  を整数とした混合整数計画問題として考察することとする。

さて、市場での競争について、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モデルで示された段階での競争と考える。このように考えることで、部分ゲーム完全解を与える解を求めることで、競争均衡の解を求めることができる。ただし、Adler (2001) も言及しているように、整数を含むネットワーク・デザイン問題の場合、安定な均衡解を得る、すなわち部分ゲーム完全解を得ることが必ずしも可能であるとは限らない。このため、均衡解の候補となる可能性のある解（部分ゲーム完全解、Stackelberg 解、Mini-max 解）を全て抽出し、分析した。

## 3. 数値計算

### (1) 入力データ

ここでは single hub system を対象とし、当該ハブを共有するエアライン間の利潤最大化行動を分析する。基本パターンは 5 ノードの複占市場であり、費用は全て対称である。機材は 100, 200 の 2 種類とし、運行の限界費用はシナリオで与える。OD フローなどは表-1~2 にまとめて表記する。値は全て仮想的なものである。

<sup>1</sup> 厳密に言えば、同型の機材でもシート数にはバリエーションがある。しかし、その幅は頻度のバリエーションに比べて、はるかに狭い。このため、同型でのシート数を 1 種類と考えれば、形式別のバリエーションしか考慮しなくてよいことになる。

表-1 OD 表

| zone | 1    | 2   | 3    | 4    | 5    |
|------|------|-----|------|------|------|
| 1    | 0    | 500 | 1500 | 800  | 200  |
| 2    | 450  | 0   | 700  | 500  | 150  |
| 3    | 2000 | 600 | 0    | 3000 | 1000 |
| 4    | 700  | 250 | 2000 | 0    | 600  |
| 5    | 100  | 75  | 1250 | 400  | 0    |

表-2 OD 運賃表

| zone | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |
|------|----|----|----|----|----|
| 1    | 0  | 12 | 25 | 25 | 40 |
| 2    | 12 | 0  | 15 | 20 | 30 |
| 3    | 25 | 15 | 0  | 15 | 25 |
| 4    | 25 | 20 | 15 | 0  | 10 |
| 5    | 40 | 30 | 25 | 10 | 0  |

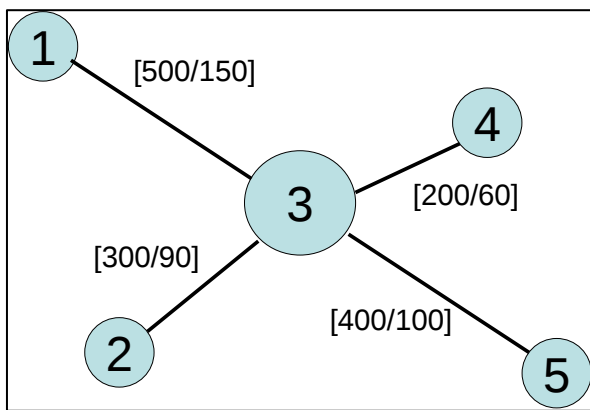


図-1 対象ネットワーク

図-1は対象ネットワークであり、ゾーン3の空港がハブであることを示している。また図中の[]内の値は左側に距離、右側にラインホール時間を示している。なお、輸送コストは限界費用を Brander and Zhang の方式で与え、平均ステージ長 3000 とし、単位輸送費用に関しては 200 席機材を 30、100 席機材をそれより 25%割高として与えている。なお、コスト、運賃は全て 1/1000 として計算には使用した。旅客の効用関数は費用、時間、頻度の経済性に対するパラメータは古川の事例を参考に時間について整理し、0.74、1、10.1 を使用し、拡散係数を 0.26 とした。また、機材の組み合わせパターンは 1 社あたり 16 通り存在する。表-3 に一覧を挙げる。表中の 1、2 はそれぞれ座席数 100、200 であることを表す。頻度の初期解は全てのリンクで 3 とした。

表-3 組み合わせパターン

| パターン No | 構成         | パターン No | 構成         |
|---------|------------|---------|------------|
| 1       | 1, 1, 1, 1 | 9       | 2, 1, 1, 1 |
| 2       | 1, 1, 1, 2 | 10      | 2, 1, 1, 2 |
| 3       | 1, 1, 2, 1 | 11      | 2, 1, 2, 1 |
| 4       | 1, 2, 1, 1 | 12      | 2, 1, 2, 2 |
| 5       | 1, 2, 1, 1 | 13      | 2, 2, 1, 1 |
| 6       | 1, 2, 1, 2 | 14      | 2, 2, 1, 2 |
| 7       | 1, 2, 2, 1 | 15      | 2, 2, 2, 1 |
| 8       | 1, 2, 2, 2 | 16      | 2, 2, 2, 2 |

## (2) 2 社による複占競争と滑走路容量拡張の影響

まず、2 社による寡占競争について取り上げ、解の基本的挙動について考察する。Adler にも示されているように、整数計画を含む競争では、たとえ完全に対称なキャリアであったとしても安定的な Nash 解を求めることは難しい。表-4 は複占市場で互に対称なコスト構造を持つキャリアの利潤最適化問題を、空港での発着回数制限を 30～90 の間で検討した結果である。

表から、発着回数制限が厳しい場合、安定的な Nash 解を得ることができるが、発着回数制限を緩和することにより安定的な Nash 解を得ることが難しく、囚人のジレンマが生じていることが分かる。ただし、いずれのエアラインも機材選択に関して悲観的な予測を行うものと仮定し、mini-max 解を採用するものと考え、安定解を得ることが分かった。また発着数に関しては発着数制限が緩和されることにより増加するものの、特定のリンク（2-3 間）での小型化が生じるにとどまり、頻度競争が促進される傾向にはないことが分かる。この結果は旅客の効用関数のパラメータに依存する結果ではあるが、滑走路容量を増加させたとしても、必ずしも小型化への転換と頻度の増加には結びつくとはいえないことが分かる。

## (3) 3 社による寡占競争と滑走路容量拡張の影響

ここではさらに競争を強化するために、3 社による寡占競争を分析した。ただし、3 社目も他の 2 社と同様に頻度・機材双方を制御変数とした場

合，カオス的な挙動になることから，問題構造を簡素化し，3 社目が機材の大きさを小型に固定して参入する場合の他のエアラインへの影響を分析することにとどめた。

表-4 均衡解の特性：組み合わせパターン（複占市場）

| 回数 | Airline 1/2 Mini-Max<br>の Nash 解 解 |          | 発着数<br>(1) |
|----|------------------------------------|----------|------------|
| 30 | (12, 12)                           | (12, 12) | 30.1       |
| 40 | (16, 16)                           | (16, 16) | 40.0       |
| 50 | (16, 16)                           | (16, 16) | 48.9       |
| 60 | (8, 8)                             | (8, 8)   | 58.8       |
| 70 | (7, 3)                             | (8, 8)   | 59.5       |
| 80 | (7, 3)                             | (8, 8)   | 59.5       |
| 90 | (7, 3)                             | (8, 8)   | 59.5       |

ここでは，Airline 1/2 の発着数は 70 回の場合に限定して紹介する．また，Airline 3 を LCC とし，他の 2 社と比較して運航費，運賃ともに 10～30% 低い場合について，LCC の発着回数制限を 50 回として計算した場合も掲載している。

表-5 均衡解の特性：組み合わせパターン（寡占市場）

| 回数     | Airline 1/2 の Mini-Max<br>Airline 3 Nash 解 解 |        | 発着数<br>(1/3) |
|--------|----------------------------------------------|--------|--------------|
| 40     | (1, 9), (9, 1)                               | (1, 1) | 69.1/40      |
| 50     | (1, 3), (3, 1)                               | (1, 1) | 69.0/49.2    |
| 60     | (1, 1)                                       | (1, 1) | 68.7/59.2    |
| 70     | (1, 1)                                       | (1, 1) | 69.0/69.2    |
| 80     | (1, 1)                                       | (1, 1) | 69.0/74.9    |
| LCC    | 1/2 の Nash 解 Mini-Max<br>解 解                 |        |              |
| LCC 10 | (3, 3)                                       | (3, 3) | 63.9/49.3    |
| LCC 20 | (1, 1)                                       | (1, 1) | 69.4/49.1    |
| LCC 30 | (3, 3)                                       | (3, 3) | 63.8/48.6    |

表から，3 社目が参入することにより大型機を投入するパターンが減少し，小型機による運行を採用することがわかる．特に Airline 3 への割り当て発着回数が増加するに従い強化される傾向にある．さらに，発着回数に関しても既存エアラインは制限が 70 回の場合，複占市場の場合では約 60 回の発着数で制限一杯まで使用していないが，3 社目が参入した場合，発着制限回数一杯まで使

用するという結果を得た．均衡解の特性に関しては，Airline 3 への割り当てが増加することで，安定した部分ゲーム完全解が得られるという結果となった．これは既存研究で指摘されている，「競合相手の数が増加することで競争が促進される」という指摘に整合する．一方，Airline 3 が LCC となる場合，小型機への転換は費用構造が対称の場合よりも進むという結果を得た．また，Airline 3 への発着数割り当てが 50 の場合と比較すれば，安定した部分ゲーム完全解が得られることがわかった．このことから，小型機への転換を誘導する場合，割り当て発着回数が限定される可能性があるのであれば，小型機専用の LCC を誘致することは有効な政策であるという示唆を得た．

#### 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数値実験を通じて検討を加えた．その結果，複占で対称なエアラインの場合，発着数制限の緩和による小型機転換は必ずしも進まないという結果を得た．そして，小型機専用のエアライン導入により，既存エアラインの小型機への転換が促進されるという示唆を得た．なお，紙面の都合上，ネットワークの形状など詳細な出力に関しては講演時に紹介する．

#### 参考文献

- 1) Panzar, J.C.: Regulation, deregulation and economic efficiency: the case of the CAB, American Economic Review, 70, 311-315, 1980.
- 2) Adler, N.: The effect of competition on the choice of an optimal network in a liberalized aviation network with an application to Western Europe. Transportation Science 39, 58-72, 2005.
- 3) 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，No.24, 427-436, 2007.
- 4) 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.