

旅客およびエアラインの行動に基礎をおいた階層的フライトネットワークモデル

A Hierarchical Flight Network Model based on Passengers' and Airlines' Behavior

家田 仁*, 望月篤**, 柴崎隆一***, ファン レビン****

By IEDA Hitoshi, MOCHIZUKI Atsushi**, SHIBASAKI Ryuichi***, and PHAN Le Binh*****

1. はじめに

アメリカ国内航空市場において 1978 年に航空規制緩和法が成立し, 1984 年には, 経済的規制を担当していた政府の民間航空委員会が廃止された. それに伴いエアライン間の激しい競争が起こり, 各路線に参入するエアラインや便数が大きく変動するようになった. それと同時に, 特定の空港へ路線を集中させることによってより少ない機材で多くの都市に就航することができる路線網体系である, ハブ&スポーク型ネットワークの進展も, 各エアラインの路線網形態に大きな影響を与えた. さらに最近では, エアライン間の提携行動 (アライアンス) や FFP (Frequent Flyer Program, 多頻度旅客優遇制度) の進展など航空市場は新たな激動の時期を迎えている.

そのような動向に対し, 巨額の費用を必要とする空港施設の整備計画 (空港整備優先順位, 整備規模) を今後どうすべきか, またどのような航空政策 (路線参入・運賃・便数に対する規制) が旅客やエアラインそして空港管理者にとってのぞましいかを議論する機運が高まっている. そのためには現状の航空市場の全体像を正しく把握し, 将来の航空市場を定量的に予測する必要がある. そこで本研究は, エアラインの自由な路線や便数の設定が行われており, 自由な競争が行われているアメリカ国内航空市場を対象として, 旅客とエアラインの行動の双方にネットワーク配分手法を適応することにより, 複雑な航空市場を合理的かつ簡便にシミュレート可能な航空市場モデルを構築することを目的とする.

2. 既往の研究と本研究の特徴

規模の経済性を要因としたハブ&スポーク型ネットワークを扱った研究は, 空港の配置問題^{1),2)}, 直行型ネットワークとの比較^{3),4)}, スケジューリング問題⁵⁾, 複数事業者の競争^{6),7)}など, 理論的側面からの研究は進んでいるものの, 実際の航空市場を説明できる実用的なモデルの構築という点では発展途上といえる. 実用的な航空市場モデルを目的とした研究としては, 黒田ら⁸⁾, Weidnerら⁹⁾の研究が挙げられるが, 構築したモデルの実証的な分析を行っていない, 離散的な解法で計算が簡便でない, エアライン側の費用構造を十分に考慮していないことなどが, 問題点として挙げられる.

そこで本研究では, 筆者らによる国際コンテナ貨物流動モデル¹⁰⁾を参考に, ①旅客のエアライン選択行動を考慮することによるエアライン間の競争の表現, ②認知利潤最大化原理に基づく各エアラインの旅客輸送経路および路線別輸送人員の選択行動を考慮することによる, エアラインの提供する旅客輸送ネットワーク形態の表現, ③空港の整備状況や発着料などがエアラインの運航費用に与える影響を考慮することによる, 空港管理者の行動が航空市場に与える影響の評価, ④複雑な航空市場の合理的かつ簡便なシミュレーション, を可能にするモデルを構築する.

3. モデルの構築

(1) モデルの全体構造

本モデルは, 航空制度や空港整備状況といった航空市場環境および旅客需要を入力とし, 旅客の利用エアライン, エアラインの設定する路線の形状および便数, 各空港への路線やフライトの集中の度合等を出力とする. 対象とするのは 1998 年のアメリカ国内航空市場 (都市数 100, 対象エアライン数 9 と簡

キーワード: 経路選択, 配分交通, ネットワーク交通流, 空港計画
*正会員, 工博, 東京大学大学院社会基盤工学専攻交通・都市基盤計画研究室教授 **正会員, 工修, 東京大学大学院社会基盤工学専攻元交通・都市基盤計画研究室 ***正会員, 工修, 東京大学大学院社会基盤工学専攻交通・都市基盤計画研究室助手 ****学生会員, 工修, 東京大学大学院社会基盤工学専攻交通・都市基盤計画研究室 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, Tel 03-5841-6119, Fax 03-5841-8506, ieda@trip.t.u-tokyo.ac.jp)

略化し、異なるエアライン間を乗継ぐ旅客は扱わないが、アメリカ国内旅客数の約62%を取り扱うことができる)である。

本モデルの構成は以下の通りとなっている。

- ①旅客需要 (OD 交通量) とフライトデータを所与として、旅客が一般化費用を最小化するようエアラインおよび経路を選択する。
- ②この結果得られるエアライン別旅客需要をもとに、各エアラインは期待利潤を最大化するよう輸送パターン (路線別輸送人員) を決定する。ここで期待利潤はエアラインがある輸送パターンを設定したときに期待される運航収入から運航費用を引いた値とする。
- ③空港ごとに発着数を総計し、これと各空港の容量より混雑状況 (フライト遅延時間) が算出される。
- ④各エアラインはフライト遅延時間をふまえて再び輸送パターンを決定する。この操作を各空港の発着数が安定するまで繰返し行う。
- ⑤④により得られた各路線の運航便数、運賃などを用いて再び旅客がエアラインおよび経路を選択し、続いてエアラインが輸送パターンを決定する。ここで、各路線の運賃は、エアラインの費用を旅客1人あたりに換算した値とする。この操作を、エアラインが決定する各路線の輸送人員が収束するまで繰返し行う。実績値をモデルに入力して計算を行った結果、計算サイクル数4回で十分に収束することが分かった。

(2) 旅客のエアライン・経路選択サブモデル

旅客は、各自の一般化費用を最小化するようにエアラインおよび経路を選択すると仮定し、ネットワークの配分手法として利用者均衡 (UE) 配分を用いる。各路線 (リンク) k における旅客一人あたりの一般化費用 Cp_k (US\$) としては、運賃 $Cfare_k$ (US\$)、乗継時間 Ttr_k (hour)、フライト時間 Tfl_k (hour)、運航間隔 $Tfreq_k$ (hour)、満席機会費用 $Cfull_k$ (US\$) を考慮する。すなわち、

$$Cp_k = Cfare_k + a_1 \cdot Ttr_k + a_2 \cdot Tfl_k + a_3 \cdot Tfreq_k + a_4 \cdot Cfull_k \quad (1)$$

ここで、 a_1, a_2, a_3, a_4 は未知パラメータ。このうち、フライト時間 Tfl_k は(2)式で表される。

$$Tfl_k = v \cdot d_k + Tland + delay_{発空港} + delay_{着空港} \quad (2)$$

ここで、 v : 航空機速度 ($=1.95 \cdot 10^3$ hour / mile), d_k : 路線 k の距離 (mile), $Tland$: 離発着所要時間 ($=0.69$ hour), $delay_i$: 空港 i の混雑による遅延時間 (hour)。遅延時間 $delay_i$ は、FAA (アメリカ航空協会) の調査結果より(3)式のように表される。

$$Delay_i = 0.0545 \cdot \left(\frac{f_i}{Cap_i} \right)^{10.3} \quad (3)$$

ここで、 f_i : 空港 i の離発着回数 (回/年), Cap_i : 空港 i の空港容量 (可能離発着回数 (回/年))。

また、(1)式中の満席機会費用 $Cfull_k$ は、各路線の座席数が需要に対して逼迫する場合に座席が確保できないリスクとして旅客が認識する費用であり、(4)式のように需要に対して逓増的な関数を仮定した。

$$Cfull_k = \begin{cases} \left(\frac{D_k}{S_k} \right)^{a_5} & (if \ D_k \leq S_k) \\ 1 + 99 \cdot (D_k - S_k) & (if \ D_k > S_k) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 D_k : 旅客需要 (人/年), S_k : 提供座席数 (人/年), a_5 : 未知パラメータ。

(3) エアラインの輸送パターン決定サブモデル

各エアラインは、自社内各路線における期待運航収入から費用を引いた、期待利潤の総和を最大化するよう輸送パターンを決定すると仮定し、ネットワークの配分手法としてシステム最適 (SO) 配分を用いる。ここで、各エアラインの期待利潤 EP_k は、長期的に見れば市場均衡状態を仮定しているのでゼロとなるが、本研究では、各エアラインが、決定された輸送パターンに基づいて各期ごとに近視眼的に算出される期待旅客需要から得られる、「短期的な」期待利潤の最大化行動を仮定する。すなわち、

$$EP_k = Ca_k \cdot ED_k - Ca_k \cdot D_k \quad (5)$$

ここで、 Ca_k : 旅客一人あたりの運航費用 (US\$), ED_k : 次期の期待旅客需要 (人/年)。期待旅客需要 ED_k は一般化費用の関数であり、(6)式のように仮定する。

$$ED_k = a_6 \cdot \exp(-a_7 \cdot Cp_k) \cdot D_k \quad (6)$$

ここで、 a_6, a_7 は未知パラメータ。

また、運航費用 Ca_k は(7)式で表される。

$$Ca_k = Cfl_k + Cterm_k + Cland + Cent \tag{7}$$

ここで、 Cfl_k ：フライト費用（US\$）、 $Cterm_k$ ：旅客数に対する規模の経済性が働くターミナル費用（US\$ / 発着回・人）、 $Cland$ ：機体重量に比例する発着料（=1.35 US\$/pond）、 $Cent$ ：路線参入にかかる固定費用（未知パラメータとする）。フライト費用 Cfl_k はフライト時間の1次関数と仮定し、FAAのデータより(8)式のように推定した。

$$Cfl_k = 16.0 \cdot Tfl_k + 4.8 \tag{8}$$

ターミナル費用は各エアラインの年報の費用内訳データより、低コスト（アメリカウエスト航空、サウスウエスト航空）のエアラインとそれ以外のエアラインの別に、(9)式のように推定した。

$$Cterm_k = 28.7 + \frac{2.75 \cdot 10^6}{D_k} \text{ (低コストエアライン)} \tag{9}$$

$$Cterm_k = 78.1 + \frac{4.21 \cdot 10^6}{D_k} \text{ (その他のエアライン)}$$

（４）未知パラメータの推定

旅客およびエアラインのリンクコスト関数に含まれるパラメータのうち、時間価値や路線参入費用など過去の実績値として得られないものは、モデルによる推定値と1998年における路線別輸送人員の実績との平均誤差を最小化する方法で推定した。その結果を表1に示す。推定されたパラメータはオーダー的に妥当な値となっている。

表1 推定されたパラメータ値

	意味	推定値
a_1	乗継不効用（US\$ / 乗継回）	120
a_2	フライト時間費用（US\$ / hour）	33
a_3	搭乗機会費用（US\$ / hour）	4.0
a_4	満席機会費用係数（US\$）	650
a_5	満席機会費用乗数	2.0
a_6	旅客需要パラメータ	1.01
a_7	旅客需要パラメータ	0.0015
$Cent$	路線参入費用パラメータ	8000

4. モデル推定結果と実績値の比較

旅客のエアライン選択行動の結果であるエアライ

ン別旅客数シェアについて、実績値（1998年）とモデル推定値との比較を図1に示す。モデル推定値は実績値と非常に近く、旅客の行動モデルの妥当性が確認された。なおエアライン別ODペア別の旅客数の実績値と推定値についても決定係数が0.813と高い相関が得られた。また、エアラインの旅客輸送パターン決定行動の結果である路線別輸送人員について実績値と推定値とを比較した結果、図2に示すように高い相関が見られた。さらに、年間輸送人員が10万人以上の路線（1日約2便以上運航される路線に相当）について、実績とモデルにより推定された路線図の比較例（デルタ航空）を図3に示す。ネットワークの形状および路線数の双方において、本モデルが現状をかなりの精度で再現することができることがわかった。他のエアラインについても同様の高い再現性が得られた。

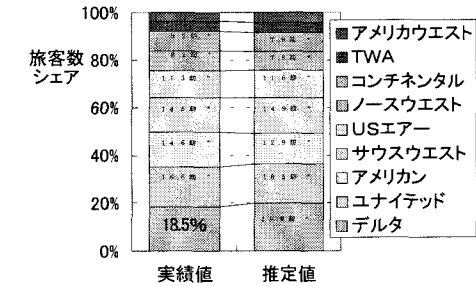


図1 エアライン別旅客数シェア

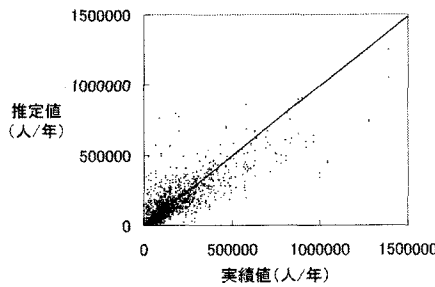


図2 路線別輸送人員の実績値とモデル推定値の比較

5. モデルの空港拡張整備評価への適用例

最後に、モデルの適用例として、混雑空港の改善プロジェクトのシミュレーション結果を示す。ここでは、空港拡張整備によりシカゴ空港の容量が1.5倍増加（滑走路の2本新設に相当）するというシナリオを想定する。シカゴにおける乗継旅客数につい

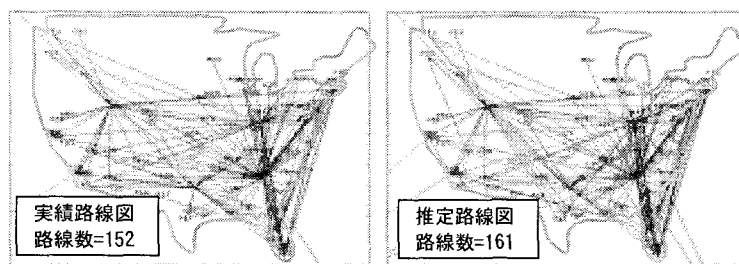


図3 実績路線図とモデル推定路線図（デルタ航空）

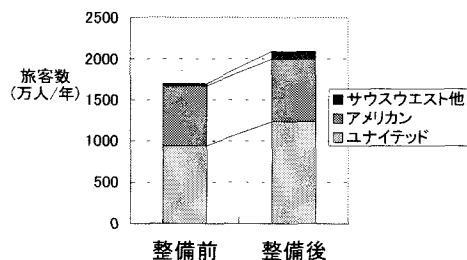


図4 空港整備前後の乗継ぎ旅客数の変化

て、整備前後の比較を図4に示す。整備の結果、乗継旅客数が約22%増加している。なお、乗継旅客の増加は、特にシカゴをハブ空港とするユナイテッド航空とアメリカン航空において大きく、空港整備がその空港をハブとするエアラインに最も恩恵を与えることがうかがえる。またシカゴを発着するフライトの遅延については、発着数は増加したものの、空港の容量が十分に拡大されているため、結果として遅延時間が大幅に緩和された。また、エアラインのネットワークに与える影響について考察する。シカゴにおいて旅客数のシェアが最も大きいユナイテッド航空(主要なハブ空港はシカゴとデンバーである)の、年間輸送人員25万人以上(1日約5便以上運航される路線に相当)の路線について、整備前後の路線図を図5に示す。シカゴの空港拡張整備によって、シカゴ発着の路線数は大きく変化しないのに対し、

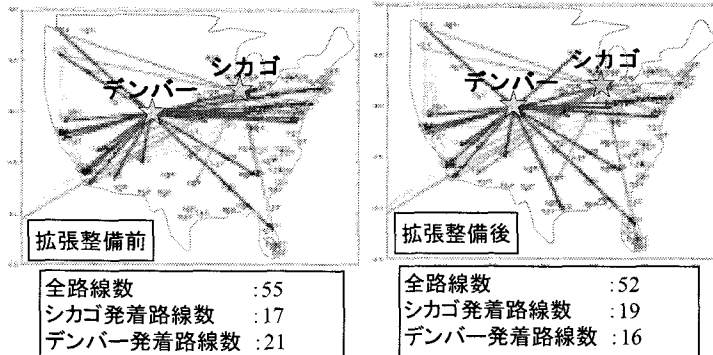


図5 空港整備がエアラインの路線網に与える影響

デンバー発着の路線数が大きく減少しており(乗継旅客数が約16%減少)、シカゴのハブ機能の強化により、デンバーのハブ機能が相対的に弱まったことがわかる。

6.まとめと今後の課題

本研究における成果として、実際規模のネットワークにおいて旅客のエアライン・経路選択行動およびエアラインの輸送経路決定行動の両者をモデル化し、モデルの出力結果とアメリカ航空市場における実績値とを旅客のエアライン選択行動およびエアラインによる旅客の輸送経路決定行動の双方について比較し、自由競争航空市場における本モデルの妥当性を確認した。そしてモデルの適用例として、航空市場の変化が旅客の行動に与える影響について空港整備効果評価を行った。しかし本研究はまだその緒についたばかりであり、旅客需要を変動型とした場合の分析、他時点データによるモデルの妥当性の検証、旅客の層別化(ビジネス旅客と観光客)など、多くの課題が残されている。

参考文献

- 1) E.M.O'Kelly, The Location of Interacting Hub Facilities, *Transportation Science* Vol.20, No.2, pp.92-106, 1986.
- 2) M.Sasaki, A.Suzuki, and Z.Drezner, On the selection of relay points in a logistics system, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, Vol.14, pp. 39-54, 1997.
- 3) S.Gordon and R.DeNeufville, Design of Air Transportation Networks, *Transportation Research* Vol.7, pp.207-222, 1973.
- 4) K.Hendrics, M.Piccion, and G.Tan, The Economics of Hubs: The Case of Monopoly, *Review of Economic Studies*, 62, pp.83-99, 1995.
- 5) C.F.Wheeler, Strategies for Maximizing the Profitability of Airline Hub-and-Spoke Networks, *Transportation Research Record* 1214, pp.1-9, 1989.
- 6) M.Hansen, Airline Competition in a Hub-dominated Environment, *Noncooperative Game Theory*, *Transportation Research B* 24, pp.27-43, 1990.
- 7) J.K.Bruckner and P.T.Spiller, Competition and mergers in airline networks, *International Journal of Industrial Organization* Vol.9, pp.323-342, 1989.
- 8) 黒田・竹林・鈴木・宮内, アジア旅客を対象とした国際航空旅客輸送市場のモデル分析, *土木計画学研究・講演集*, No.22(1), pp.211-214, 1999.
- 9) J.T.Weidner, Hubbing in U.S Air Transportation System: Economic Approach, *Transportation Research Record* 1562, pp.28-37, 1996.
- 10) 家田・柴崎・内藤, アジア圏国際コンテナ貨物流動モデルとその配分原理に応じた特性分析, *土木計画学研究・講演集*, No.20(2), pp.101-104, 1997.