

ローコストキャリアの行動を考慮した航空旅客輸送市場のモデル化*

Model of Air Transport Market Concerning Low Cost Carrier's Behavior*

竹林幹雄**

By Mikio TAKEBAYASHI**

1. はじめに

テキサスをベースとするSouthwest Airlinesの成功以来、自由化された航空旅客輸送市場では、低価格運賃戦略で既存キャリアに対抗するローコストキャリア（以後LCC）の存在は今や新たなビジネスモデルとしてとらえられつつある¹⁾。90年代以降では大陸横断市場で成功したJetBlueや、シカゴを起点にしたSongの登場など米国国内市場で多くのクローンを作り出した。彼らSouthwest クローンの基本戦略は、ネットワーク・キャリア（フルサービスキャリア：以後FSC）の基本戦略の「逆」を行くものである。代表的なものとしては、混雑空港を避けるため郊外空港を結ぶ2点間輸送、フライトベースのチケット価格、小型機（Boeing 737やAirbus A320）による多頻度輸送、ノーフリルと呼ばれる機内サービスの徹底的な縮小化、などである。

こういった行動はFSCのカバーする範囲の「外」、つまりは「すき間」で利益を上げているものであると考えられてきた。事実、Southwest Airlinesも最初の営業はテキサスの地方空港間での営業であり、ネットワーク・キャリアの路線に接続するサービスや、単なる地域サービスのフライト（regional flight）と大差ないように見られた。しかし、資本効率が20%以上になるという高利潤体質、拡大する路線などからその後クローンが多数登場することとなった。

FSCも自社内子会社を設立し、対抗したものの、これほどの成功は実現しなかったと報告されている²⁾。一方、運営するネットワークパターンは異なるが、LCCは欧州にも登場し、2000年以降大幅に業績を伸ばしているRyanairやEasyjet、British Midland Airwaysの子会社として登場したBMI Babyが代表例として挙げられることが多い。さらにこうした流れはアジア・オセアニアにも飛び火し、オーストラリアでのVirgin Blueの成功にはじまり、Value AirやTiger Airの登場によるシンガポール-バンコク路線での価格競争激化や、マレーシアのAir Asiaの路線拡大など、アジアでは国際的な競争がFSC同士の競争にとどまらず、LCCの登場でさらに複雑化する傾向にある。

*キーワード：ローコストキャリア、階層構造、MPEC

**正員，工博，神戸大学工学部建設学科

（神戸市灘区六甲台町1-1，TEL078-803-6017）

さて、LCCはFSCと異なり比較的短距離で利益を上げると考えられてきた³⁾が、近年ではJetblueの成功で知られるように、3000マイル以上の長距離市場にも参入が生じている。こういった流れを見れば、現行では参入はないものの、アジア太平洋路線など長距離路線にも参入の可能性も簡単に否定されるものではないと考えられる。この場合、既存キャリアであるFSCの反応パターンを把握することは今後の空港経営ならびに航空政策を考える上で必要不可欠な情報となる。

本論文は近年多くの市場で台頭するLCCのネットワーク・キャリアの行動が市場に与える影響を検討するため、LCCが市場に参入した場合に既存キャリアがとる行動を表現できるモデル化を構築し、数値計算を通じてモデルの挙動を把握する。

2. ネットワーク競争のモデル化

(1) 航空市場における競争のモデル化

航空市場におけるエアライン間の競争のモデル化は80年代以降盛んに研究されてきた。特に、航空市場はネットワークの形成が直接の戦略になることが多く、ネットワークの外部性を考慮したモデル化を試みる人が多い。

まずハブ空港の形成に関してはKanafani and Ghobrial⁴⁾、Hansen and Kanafani⁵⁾が挙げられる。彼らはエアラインのネットワーク形成を利用者の路線選択行動を内生化的なことで説明し、ハブ空港における料金の上昇がスポークサービスを増加させるという示唆を与えている。

また、エアライン間の競争を理論的に説明したものとして、Brander and Zhang⁶⁾やOum et al⁷⁾が挙げられる。Branderらはエアライン間の競争では価格競争、供給量競争、潜在的トラストの3形式が形成されることを理論的に示した。Oumらは生産されるサービスの違いによる競争の程度を実証により確認した。また、ネットワークサービスの違いに起因するエアライン間の競争についてゲーム論的考察を加えたものにOum et al⁸⁾やHendricks et al⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾が挙げられる。特にHendricksらの一連の研究は、ハブ・スポーク型ネットワークサービスを行うエアラインの潜在的な競争力を「輸送密度の経済性」により説明できることを示した。Oumや

Hendricksの研究は純経済学的な視点に立ったアプローチであり、需要構造に焦点を当てたものということがいえよう。エアラインの挙動は極めて精緻に説明されるが、運賃や輸送料以外の情報、すなわち「どのようなネットワークが形成されるか」といったエアラインの輸送能力を直接推計することが難しいという面を持つ。特にSouthwestをはじめとしたLCCは、結果として多頻度輸送を行っているのではなく、需要を獲得するための「戦略」として多頻度輸送を行っているのである。このSouthwest型のLCC行動を表現するためには、「輸送頻度」をモデルに明示的に取り入れる必要がある。この点を明確にしようとしたアプローチにHansen¹²⁾を挙げることができる。しかし、Hansenモデルでは準均衡のみが求められるという結論にとどまっており、解の信頼性向上という課題がある。

さてモデルに輸送頻度を取り入れることは、空港におけるスロット制約を明示的に考慮することになり、合理的なスロット配分を評価する場合にも利用可能である。しかし、輸送頻度をモデルに取り入れた場合、路線での輸送能力制約が加わるなど、最適化問題としては求解が非常に困難になるということを克服しなければならない。

頻度を含んだネットワーク構成問題を厳密に定式化した研究としてはAdler¹³⁾が挙げられる。Adlerは対称なキャリアを想定し、頻度、価格、投入機材の種類の3要素を戦略としたネットワーク競争モデルを提案している。一般化Nash均衡を厳密に採用したモデルであり、具体的なアルゴリズムの開発、機材切り替えの傾向など示唆も多いが、得られた解の安定性が保証できないという欠点を持つ。

エアライン間の競争ではなく、ネットワーク構成を旅客の最適化行動の制約下で定式化したものとしてHsu et al¹⁴⁾が挙げられる。ここでは台湾国内市場を対象として、旅客の行動を利用者均衡配分、エアラインの行動を費用最小化とした2階層最適化モデル(MPEC)として定式化している。ここではPatriksson and Rockefeller¹⁵⁾¹⁶⁾などで提案されている感度分析型最適化を解法として採用している。しかし、出力として頻度は評価されているものの、エアライン間の競争を考慮せず、実質的に独占者行動を仮定している点が汎用性に欠けるという問題がある。

竹林¹⁸⁾¹⁹⁾はFSCが存在する条件下でLCCが市場を侵食する過程を分析するモデルをMPECとして提案している。本稿ではこのMPEC型のモデルを拡張し、FSCの戦略の変更について定性的分析を試みるとともに、MPEC型モデルの特性を検討する。

(2) モデルのフレーム

次のような状態を考える。市場には2種類の輸送サービスを提供するエアラインが存在する。ハブ・スポーク型(以後HS)のサービスを提供するFSCと、HSキャリアと比較して低コストで運行可能なLCCが存在すると仮定す

る。FSCはHSサービスを展開し、その運賃は各ODマーケット(r :発ゾーン, s :着ゾーン)ごとに決定できると仮定する。ただし、簡単のため乗り継ぎ運賃は直行運賃の合成で構成されるものとし、ディスカウントパラメータが外生的に与えられるものとする。一方、LCCは2点間輸送を基本とし、乗り継ぎサービスも行すが、運賃は運行区間(リンク)ごとに与えられるものと仮定する。なお、ここではそれぞれ1社のみ存在するとして定式化を行っているが、それぞれが複数の場合でも基本的には同じである。また、想定されるOD交通量 X^{rs} は与件であるとする。なお、本モデルはLCCが参入した状態でのFSC/LCC双方の行動を分析するためのモデルであり、LCCの参入可能性を評価するためのモデルではない。したがって、LCCの参入があれば対象とするOD市場の距離の長短にかかわらず、本稿で示したものと同一分析フレームでFSC/LCC双方の行動を議論することが可能であることを付記する。

(3) FSC

FSCはHSサービスを提供することで自己の利潤を最大化することを目的とする。FSCは空港間のフライト数 f_l^{FS} 、およびODペアごとに決定される経路運賃 P_{rs}^{FS} を操作変数とする¹⁾。各リンクのFSCの運行費用 C_l^{FS} 、路線維持に要する固定費用 $C_l^{FS, FIX}$ を考慮することで、FSCの利潤最大化問題を定式化することができる(式(1))。ここでの制約は、リンクでの座席供給数が配分交通量を下回らないこと(式(2))、LCCおよび旅客の最適化行動を考慮すること(式(5)および(6))¹⁷⁾¹⁸⁾である。また、簡単のため、空港でのスロット制約は明示的には与えない。ただし、エアラインの契約しているゲート数により、後述する旅客の費用が変化すると仮定し、スロット制約の影響を間接的に表現することとした。

【最適化問題：FSC】

$$Z^{FS}(f_l^{FS}, p_{rs}^{k, FS}) = \sum_{l \in \Theta^{FS}} \sum_{rs \in \Theta^{FS}} p_{rs}^{k, FS} x_{rs}^k \delta_{rsk}^{HS} - \sum_{l \in \Theta^{FS}} f_l^{FS} C_l^{FS} - \sum_{l \in \Theta^{FS}} C_l^{FS, FIX} \rightarrow \max \quad (1)$$

Subject to

$$x_l^{FS} \leq V_l^{FS} f_l^{FS}, \quad \text{for } \forall l \in \Theta^{FS}, \quad (2)$$

$$p_{rs}^{k, FS} \geq 0, \quad \text{for } \forall k \in \Omega^{FS}, \quad (3)$$

¹⁾ ただし、American AirlinesにおけるAmerican Eagleの設立のように、FSC内にLCCを子会社として設置し、既存LCCに対抗する、あるいは複雑なイーロード・マネジメントを駆使するといった高度な戦略は本モデルでは考慮していない。ここでは静学的分析の際に標準的に含まれる要素である便数(頻度)と運賃のみで戦略が構成される場合に限定してモデル化を行っている。

$$f_l^{FS} \geq 0 \quad \text{for } \forall l \in \Theta^{FS}, \quad (4)$$

$$\mathbf{f}^{LC} = \arg \max \{Z^{LC}\}, \quad (5)$$

$$x_{rs}^k = \arg \max \{Z^A(\mathbf{f}^{FS}, \mathbf{p}^{FS}, \mathbf{f}^{LC})\}. \quad (6)$$

ここで δ_{nsk}^{FS} : rs OD市場 k 番目のルートがFSCによって運行される場合 1, それ以外はゼロとなる 2 値変数, x_{rs}^k : rs OD市場 k 番目のルートの配分旅客数, V_l^{FS} : FSCが供給するリンク l の機材容量, x_l^{FS} : FSCによって運行されるリンク l での配分旅客数, Θ^{FS} : FSCの運行するリンクの集合, δ_{nsk}^{LC} : FSCにより運行される rs OD市場 k 番目のルートにリンク l がある場合 1, それ以外はゼロを取る 2 値変数, $\mathbf{f}^{FS}$, $\mathbf{f}^{LC}$, $\mathbf{p}^{FS}$ 制御変数ベクトル, Z^A : 旅客の最適化行動を表す関数である. また, リンク交通量とルート交通量は以下のような関係がある.

$$\sum_{rsk} x_{rsk}^k \delta_{nsk}^{FS} = x_l^{FS} \quad \text{for } \forall l \in \Theta^{FS}. \quad (7)$$

(4) LCC

LCCはFSCと同様に収益の最大化を図るものとする。ただし、モデル化に際しては次のような厳しい仮定を設けた。

本来はLCCの戦略もFSCと同様便数 f_l^{LC} と運賃 p_l^{LC} である。実際LCCの典型例であるSouthwest Airlinesは多頻度・低価格戦略を採っているが、このように双方とも便数と運賃を戦略にした場合、解の挙動が非常に複雑になり、Adler¹³⁾が指摘するように求解そのものが困難になる可能性がある。本モデルではそのような困難性をできるだけ回避するため、多頻度・低価格戦略そのものは実現した状態を前提としてLCCの行動を表現することとした。換言すると、便数と価格の間に特定の関数関係が存在し、その結果多頻度・低価格戦略が実現していると仮定することとした。このように考えた場合、運賃、便数いずれを本質的な操作変数としてもよいと考えられるが、輸送能力という物理的な制約を考えた場合、便数を戦略とした方が適切であると考えた。ゆえにLCCの操作変数は便数とする。

さて、便数と運賃の関数関係に関しては最低ロードファクター ω^{LC} およびマークアップ率 η を導入することで表現されるものとした。これは実際のLCCの行動で高いロードファクターが観察されていることを反映したものである。ただし、本モデルでは最低ロードファクターおよびマークアップ率は政策変数であり、最適なマークアップ率を求めることは本モデルではできない。

LCCの行動を決める際、FSCのネットワーク戦略は与件である。

【最適化問題：LCC】

$$\begin{aligned} Z^{LC}(\mathbf{f}^{LC} | \mathbf{p}_{rs}^{k,LC} &= \sum_{l \in \Theta^{LC}} p_l^{LC} \delta_{nsk}^{LC}) \\ &= \sum_{rs} \sum_k p_{rs}^{k,LC} x_{rs}^k \delta_{nsk}^{LC} = \sum_{l \in \Theta^{LC}} p_l^{LC} x_l^{LC} \rightarrow \max \end{aligned} \quad (8)$$

Subject to.

$$\omega^{LC} V_l^{LC} f_l^{LC} \leq x_l^{LC} \leq V_l^{LC} f_l^{LC}, \quad \text{for } \forall l \in \Theta^{LC} \quad (9)$$

$$x_l^{LC} p_l^{LC} (1 + \eta) - C_l^{LC} f_l^{LC} - C_l^{LC, FIX} = 0, \quad \text{for } \forall l \in \Theta^{LC} \quad (10)$$

$$f_l^{LC} \geq 0 \quad \text{for } \forall l \in \Theta^{LC}, \quad (11)$$

$$x_{rs}^k = \arg \max \{Z^A(\mathbf{f}^{FS}, \mathbf{p}^{FS}, \mathbf{f}^{LC})\}. \quad (6)$$

ここで V_l^{LC} : LCCが供給するリンク l の機材容量, x_l^{LC} : LCCによって運行されるリンク l での配分旅客数, Θ^{LC} : LCCの運行するリンクの集合, である。

(5) 旅客

OD ペアごとに定義される旅客の経路選択行動は自己の効用を最大化するように行動する。ただし、旅客は以下の費用も考慮する必要があると仮定する。

- 1) エアラインのスケジュールコストは最終的に旅客の効用に反映される。
- 2) 利用旅客数が供給座席数に近づくほど、希望するフライトに乗りなくなる可能性が高くなるという見込み費用が増加する。

ここで、ランダム効用理論に従い、旅客の行動に確率的利用者均衡状態を仮定すると、Logit型の最適解の条件式を得ることができる。

【旅客行動の均衡解：SUE/FD】

$$x_{rs}^k = \frac{\exp \left[\theta \left\{ v_{rs}^k - p_{rs}^k - \tau (t_{rs}^k + \sum_h D_h^m \delta_{nsk}^{LC}) - \sum_l \Gamma(x_l) \delta_{nsk}^{LC} \right\} \right]}{\sum_k \exp \left[\theta \left\{ v_{rs}^k - p_{rs}^k - \tau (t_{rs}^k + \sum_h D_h^m \delta_{nsk}^{LC}) - \sum_l \Gamma(x_l) \delta_{nsk}^{LC} \right\} \right]} X_{rs}, \quad (12)$$

ここで f_{rs}^k : rs 市場経路 k における平均輸送頻度, t_{rs}^k : 経路 k における総移動時間であり、

$$t_{rs}^k = \sum_l t_l \delta_{nsk}^{LC}. \quad (13)$$

と構成される。 t_l : リンク l のラインホール時間, δ_{nsk}^{LC} : k 経路にリンク l が含まれている場合 1 を取り、それ以外はゼロとなる 2 値変数。 D_h^m : エアライン m (m =FSC or LCC) を旅客が選択した際に見込まれる追加的な費用であり、以下に定義するスケジュールコストを含むものとする。

本モデルでは「旅客にとって利便性の高いスケジュール

を設定できるほどスケジュールコストは小さい」と定義している。すなわち、ゲートの占有数が高いエアラインほど、空港でのダイヤグラム設定の制約が少なく、混雑しても旅客の便益が高いスケジュールを組むことができることを意味する。すなわち、本モデルではスケジュールコストはエアラインが設定する総便数とゲート数によって決まるものとした。

$$D_h^m = \frac{\xi_h^l \sum_{l \in \Theta^{FS} \cup \Theta^{LC}} f_l}{F_h^m}, \quad (14)$$

ξ は正の値を取るパラメータであり、 F_h^m はエアライン m に割り当てられているゲートの数である。

τ および ν は正の値を取るパラメータであり、 Γ はリンク l での座席の取りにくさを示す混雑関数である。式 (15) のように定義した。

$$\Gamma(x_l) = \xi_l^2 \frac{x_l}{V_l}. \quad (15)$$

(6) 最適化

本モデルはエアライン間の競争は典型的な MPEC¹⁹⁾ として定義できる。通常旅客の行動は最適化問題として構成されるために最適化はきわめて複雑になる。しかし本モデルでは SUE/FD を想定しているため式(12)を計算するだけでよい。すなわち、上位問題を FSC の利潤最大化問題、下位問題を LCC の最適化問題として構成するように問題を縮小できる。

さて、MPEC を解くにあたり、解の改善方向をどのように探索するか、が最も重要な問題となる。特に本モデルのようにネットワーク競争を行う場合、自分の行動の変化と競争相手の行動によって自己の利潤が決定されるため、自己の目的関数の微分可能性が必ずしも保証されない場合がある。このような場合にも対処するように、当初から「滑らかでない」問題に対する最適化の手法の応用を試みることが考えられる。

「滑らかでない」問題に対する最も標準的な解法は Branch and Bound 法のクラスであるが、これはよく知られたように非常に計算時間を要する。特に、厳密に定義された MPEC は構造が単純であつてもかなりの計算時間が必要である。また、変数が連続である場合、近似解法にとどまるという欠点がある。一方、厳密な解法としては Patriksson¹⁵⁾¹⁶⁾ や Cho²⁰⁾ の提案する感度分析法が有力であるが、これも基本的には Branch and Bound 法と同じく非常に計算時間を要することになる。

こういった問題に対応する方法として、バンドル法²¹⁾²²⁾、あるいはその応用であるバンドル・トラスト法²³⁾ (以下 BT 法と略記) を応用することができる。

BT法は解の探索方向を劣微分で構成した「バンドル」で近似し、かつ制約条件を侵さないような信頼領域をステッ

プ幅として採用することで、構成された問題が凸であれば、微分可能性が保証できない場合でも厳密な収束解の探索が保証される。ただし、本モデルのように凸性も必ずしも保証できない場合は「準停留値(almost stationary value)」として数値的に安定な解を探索することが限界である。この場合、初期実行可能解に複数の擾乱を加えて局所的な安定性を確かめる以外に方法はない。

BT法は微分されたLagrangean (D-Lagrangean) と制約条件式によって構成される一般化Jacobianを繰り返し利用する。まず、MPECのKarush-Kuhn-Tucker型での表現を以下に記す。 λ はLagrange乗数である。

【MPEC:KKT様式】

$$\max_{p^{FS}, f_l^{FS}, f_l^{LC}} : Z^{FS}(p^{FS}, f^{FS}, f^{LC}), \quad (16)$$

subject to

$$g(p^{FS}, f^{FS}, f^{LC}) \leq 0, \quad (17)$$

$$\nabla_{f_l^{LC}} Z^{LC}(p^{FS}, f^{FS}, f^{LC})^T \nabla_{f_l^{LC}} g \lambda = 0$$

$$\text{for } \forall f_l^{LC} \quad (18)$$

$$\lambda g(p^{FS}, f^{FS}, f^{LC}(f^{FS})) = 0, \quad (19)$$

ここでは制約条件²⁾は一括して g と表現している。最適化の過程で、FSCもLCCもともにこの制約を満足しなければならないという意味で、全て下位の問題の制約として扱っても問題の一般性は失われない。

ゆえに改めて【MPEC:KKT様式】の問題における下位問題で一般化等式 (general equation : 以下GE) 表現を考えると、次のようになる。 ∂L はD-Lagrangeanであることを示す。

【GEによる表現】

$$\begin{pmatrix} \partial L(\hat{p}^{FS}, \hat{f}^{FS}, f^{LC}) \\ \min\{G(\hat{p}^{FS}, \hat{f}^{FS}, f^{LC}), \lambda\} \end{pmatrix} = 0 \quad (20)$$

さて、このGE表現を用いて、一般化Jacobianを構成すると、次のようになる。

$$\begin{pmatrix} \ell_{f^{LC}} \partial L & \ell_{f^{LC}} G^T \\ -\ell_{f^{LC}} G & 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

ここで $\ell_{f^{LC}} \partial L$ はD-Lagrangeanの f^{LC} によるJacobianであり、

LCCの挙動によってD-Lagrangeanの最適性がどのように変更されるかを示したものである。また、 G は制約式である。

式(21)はLCCの挙動によって変更されるFSCの目的関数の摂動表現であるので、以下の等式を満足する共役ベクト

²⁾等式条件と弱い不等式条件 ($\leq$) は区別せず表現している。厳密には区別 (等式を H , 不等式を G など) することが望ましい。

ル q を定めることができる。

$$\begin{pmatrix} \ell_{f^{LC}} \partial L & \ell_{f^{LC}} G^T \\ -\ell_{f^{LC}} G & 0 \end{pmatrix} \mathbf{q} = \partial_{f^{LC}} Z^{FS} \quad (22)$$

右辺はFSCの目的関数の、LCCの挙動に対する劣微分である。 Z^N が f^L に対して連続微分可能であれば方向が唯一定まる。微分不可能であれば劣微分として複数の劣微分方向で構成されるバンドルで定義される。

求めた $\mathbf{q}$ はFSCの目的関数のLCCの挙動に対する摂動を考慮した許容勾配を表す共役ベクトルであるので、以下の等式を満足する。

$$\partial_{f^{FS}} Z^{FS} - \ell_{f^{FS}} Z^{LC} \mathbf{q} = 0 \quad (23)$$

このようにして Z^N の改善方向 $\partial_{f^{FS}} Z^{FS}$ を定めることができる。

最後にステップ幅の更新であるが、ここではDog-Leg法などの信頼領域法²⁴⁾を取り入れて更新することができる。更新したステップ幅をもとにして新たな f^N , f^L に更新し、(20)および(23)が ϵ 最適になるまで続けられる。

凸計画問題であれば以上のようなアルゴリズム、すなわち許容方向と許容ステップを繰り返して更新することで最適解を得ることができる。非凸性の強い問題の場合、いくつかの初期実行可能解に攪乱を加えることで、局所最適解である準停留値を求めることができる。なお、配分計算(式(12))のHessian計算はDavisによれば簡単な変換で計算できることが示されている²⁵⁾。

3. 数値計算によるモデルの挙動の把握

ここでは、提案したモデルの挙動を簡単な数値計算により確認し、市場の定性的分析を行う。

対象とする市場は3ゾーンで構成され、ゾーン1がFSCのハブとして機能しているものとする。また、LCCは全てのゾーン間で輸送を実行しているものとする。

OD交通量その他の基本設定は以下のようにした。

- ① OD交通量：ゾーン1-2および1-3は往復でそれぞれ100とし、2-3は50とする。
- ② 機材容量：全ての機材は同一形式とし、1フライトあたり3とする。
- ③ 運行費用：FSC、LCCともに50とする。
- ④ 固定費用：FSCは1空港あたり50であるのに対し、LCCは25とする。
- ⑤ ラインホール時間：1フライト当たり10とする。
- ⑥ 割り当てゲート数：合計で1空港あたり150とし、FSCを100、LCCを50とする。
- ⑦ FSCの乗り継ぎ割引率： $\rho=0.8$ とする。

定数の値に関しては、理論計算のため特に単位は設定していないが、基本的に交通量に関しては人ないし販売席数、価格に関するものは通貨を単位とする。またゲート数に関してはエアラインごとの使用頻度として定義している。

また、パラメータ値を $\theta=0.0125$, $\tau=2$, $\xi_1=1.2$, $\xi_2=12.8$, $v=2$ とした。なお、各定数の値はAdler¹³⁾の使用した値などを参考に、本モデルに適用できるように作成した。ただし、FSCとLCCでの比率に関しては、費用に関しては固定費用に関しては具体的な数値は報告されていないため、仮想的に2:1という割合とした。この比率は計算結果に影響を与えるものの、それは規模の経済性が作用する程度に限定される。ゆえにこの比率いかんによってモデルの挙動特性が大きく変わるほどの決定的な影響を与えるものではないと考えられる。

(1) 基本的な挙動

図-1はLCCの運行費用の削減割合に対するFSCの収益率の変化、およびFSCとLCC運賃の推移を比較したものである。図から明らかなようにLCCが運行費用を切り下げた結果、運賃の低下が生じ、その結果FSCの収益が減少することがわかる。しかし、FSCは運賃レベルを引き下げることにはせず、むしろ維持する傾向にあることがわかる。

図-2はFSCとLCCの運行頻度を比較したものである。ここでもFSCの運行頻度はほとんど変化していないことがわかる。一方、LCCの運行頻度も40%引き下げ時でも25%程度の増便しか行っていない。

こういった傾向はFSCの市場占有率の変化からさらに明確になる。図-3から、LCCの価格攻勢でもFSCの市場占有率は大きく影響されず、主要市場である1-2(1-3)市場では70%近くを維持するという結果になっている。これは路線拡大を行う上で、スケジュールコストの上昇が大きいため、サービス頻度を増加しても、旅客の便益が上昇しないためである。

このような傾向はいわゆる「太ったネコの効果(Fat-Cat Effect)」²⁶⁾に該当するものであると考えられる。すなわち、FSCは利潤が減少するものの、利潤の大きさが十分大きいいため、新規参入者の行動に敏感に反応する必要はないというものである。これは従来主張されてきたFSCの挙動の一つであり、本モデルでこの挙動を表現することが可能であることを示したものである。

(2) LCCによる市場の侵食

さて、(1)のように挙動するFSCに対して、LCCが市場を侵食する条件について考察する。本モデルでは、さまざまな条件について検討することが可能であるが、ここではスケジュールコストの上昇速度を低下させることについて検討する。具体的には、本モデルでは割り当てられるゲート数の割合を変化させることで、効果を計測することとする。

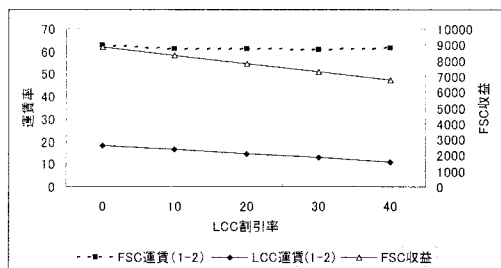


図-1 FSC収益率およびFSC/LCC運賃の比較

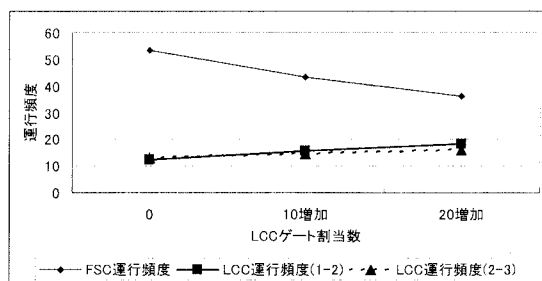


図-5 FSC/LCC運行頻度の比較（シナリオ：ゲート割当数変化）

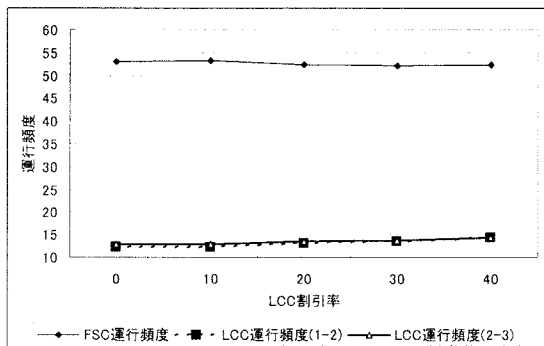


図-2 運行頻度の比較

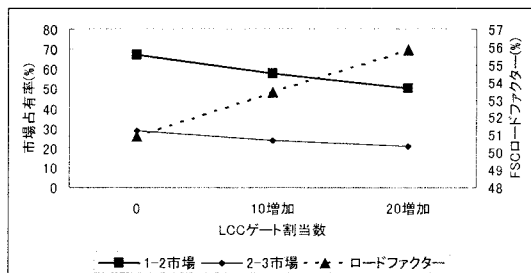


図-6 FSC市場占有率とロードファクターの比較（シナリオ：ゲート割当数変化）

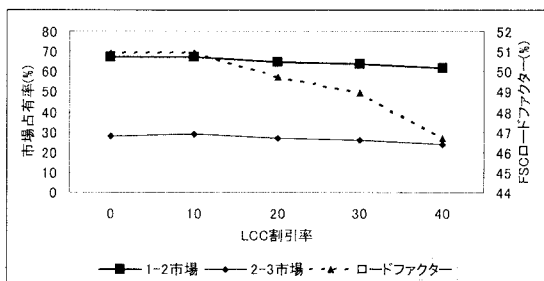


図-3 FSC市場占有率とロードファクター

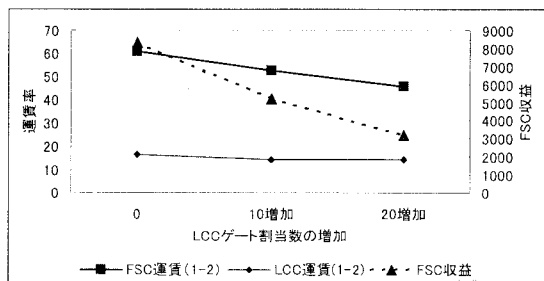


図-4 FSC収益率およびFSC/LCC運賃の比較（シナリオ：ゲート割当数変化）

通常、ゲートの割り当てルールは空港によってさまざまであり、内生的に決定される場合もある。しかし、FSCがメインキャリアとして空港に乗り入れている場合、ゲートの割り当てでも優先的に行われるなど、空港における支配力は大きいのが通常である。本モデルではこういったFSCによる空港の支配力が強い状況での挙動分析を行っており、内生的に決定される場合の検討は今後の課題としたい。

図-4では図-1と同様の比較を行っているが、ここではLCCの運行費用の切り下げが10%である場合、LCCに対するゲート割当数が増加した場合の比較を行っている。LCCの運賃率の減少はシナリオごとの変化はほとんど認められない。しかし、LCCへのゲート数割り当てが50であるのと比較して、60、70と増加するに従いFSCの収益は大幅に減少していることがわかる。同時に運賃率の下落もLCCのゲートが70に増加した場合、20%近くの下落を示していることがわかる。

図-5、6でもスケジュールコストの上昇速度が小さくなるに従い、LCCが運行頻度をメイン市場、スポーク市場ともに大幅に増加させることがわかる。その結果、FSCは市場でのシェアを大幅に減じる結果となり、収益性を保つために運賃の大幅な引き下げと運行頻度の縮小、さらには1フライトあたりの積載効率を引き上げるという戦略に変更することがわかる。

これはLCCが市場を侵食することが可能となった状態を示すものであり、その結果FSCはLCCの競争に引き込まれ

てしまったことを表す。これは村上²⁷⁾が分析した米国市場でLCCが市場侵食を行った場合にFSCに与える影響として得られた傾向と整合するものである。

換言すると、LCCはスケジュールコストに相当するコストの上昇が低い状態が確保されることで、市場侵食を開始し、その結果FSCは大きく収益性を損ない、結果として敵対的な競争に巻き込まれていくことになる。これはLCCの運行費用引き下げ割合が大きいほど拡大する傾向にあり、FSCの利潤の減少率は増加する。その結果、より高いロードファクターを実現するため、頻度のさらなる減少を伴い、さらに市場でのシェアを失うという循環を繰り返すのである。

また、図-5からゲートの割当数の格差が減少することで運行頻度の格差が縮小することがわかる。このことはネットワークにおける階層性を決定づける要素としてのスケジュールコストに格差がなくなれば、OumのいうCournot型の量的競争が表れることを示唆するものである。ただし、今回の数値計算では両者のゲート数を等しくした場合、最適解を得ることができなかった。このようにスケジュールコストが非常に接近した場合については、有効な解を得ることができなかったため、これ以上の分析は不可能となった。

5. おわりに

本稿ではLCCの市場侵食行動と、その際FSCが取る行動をMPECにより表現できることを示し、BT法をもとにした最適化アルゴリズムを提案し、数値計算によりモデルの挙動特性を示した。

数値計算から、モデルは従来主張されてきたFSCとLCCの行動のうち、条件を変えることで3つの傾向（太ったネコ、価格下落・サービスレベル低下、量的競争）まで表すことが可能であることが認められた。特に、LCCに対する参入障壁の緩和で価格競争に巻き込まれていく状態も表現することができ、今後のわが国およびアジア域内でのLCCの新規参入・路線拡張の評価を行うことができると考えられる。具体的には、①混雑空港におけるLCCへのスロット割り当ての市場全体への影響を把握することを可能とし、スロット割り当てルールを検討に資する、②地方空港への国際線LCC参入の影響も検討することができ、わが国への国際線LCC参入の是非を検討する際に支援情報を与える、ものと期待される。現在は開発したモデルを実際の市場に適用し、実際の市場でのエアラインの行動の感度などを具体的に計測することを検討している。

また、本モデルの枠組みはbi-level問題にとどまらず広範囲なネットワーク競争モデルに適用可能であることがわかってきた。これに関しては現在研究成果をまとめつつある段階であり、機会を改めて発表したい。

他方、競争的なモデルを作成しているため、トラストな

ど寡占特有の結託現象を表現することは現モデルの枠組みではできない。結託はLCCのアライアンスへの取り込みなど、現実表れてきているため、今後は結託の取扱も可能なようにさらに汎用性の高いモデルの構築を行うことが望まれる。

また前節最後で述べたように、条件によっては最適解を得ることができなかった点に対応するため、計算プログラムの洗練も含め今後の検討課題としたい。

最後に、複数解の存在の影響については無論否定できず、本モデルでの計算結果が「解挙動の分岐(bifurcation)」に相当するものである可能性は否定できない。この点については非凸計画問題特有の問題であり、今後より精査な検討を行う必要がある。

【謝辞】

本研究を実施する上で、University of CaliforniaのAdib Kanafani教授の多大な協力・指導を仰ぎました。また、University of British ColumbiaのAnming Zhang教授ならびにTae Hoon Oum教授、Tel Aviv UniversityのNichole Adler教授、神戸大学大学院経営学専攻の村上英樹助教授には国際会議等で貴重な助言をいただきました。ここに謹んでお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Mason, K. J.: Marketing low-cost airline services to business travelers, *Jnl. of Air Transport Management*, 7, 103-109, 2001.
- 2) 長谷川通：エアラインエコノミクス，中央書院，1997.
- 3) Vowles, T.M.: The “Southwest Effect” in multi-airport regions, *Jnl. of Air Transport Management*, 7, 251-258, 2001.
- 4) Kanafani, A. and Ghobrial, A.: Airline hubbing: some implications for airport economics, *Transportation Research*, A, vol.19, No.1, 15-27, 1985.
- 5) Hansen, M. and Kanafani, A.: International airline hubbing in a competitive environment, *Transportation Planning and Technology*, Vol.13, 3-18, 1988.
- 6) Brander, J.A. and Zhang, A.: Market conduct in the airline industry, *RAND Journal of Economics*, 21, 567-583, 1990.
- 7) Oum, T.H., Zhang, A. and Zhang, Y.: Inter-firm rivalry and firm-specific price elasticity in deregulated airline markets, *Jnl. of Transportation Economics and Policy*, 27, 171-192, 1993.
- 8) Oum, T.H., Zhang, A. and Zhang, Y.: Airline network rivalry, *Canadian Journal Economics*, 4a, 836-857, 1995.
- 9) Hendricks, K., Piccione, M. and Tan, G.: The economics of hubs: the case of monopoly, *The Review of Economic Studies*, Vol.62, Issue 1, 83-99, 1995.

- 10) Hendricks, K., Piccione, M. and Tan, G.: Entry and exit in hub-spoke networks, *RAND jnl. of Economics*, Vol.28, No.2, 291-303, 1997.
- 11) Hendricks, K., Piccione, M. and Tan, G.: Equilibria in networks, *Econometrica*, Vol.67, No.6, 1407-1434, 1999.
- 12) Hansen, M.: Airline Competition in a Hub-dominated Environment: an Application of noncooperative game theory, *Transportation Research, B*, Vol.24B, No.1, 27-43, 1990.
- 13) Adler, N: Competition in a deregulated air transportation market, *European Journal of Operational Research*, 129, 337-345, 2001.
- 14) Hsu, C.I. and Wen, Y.H.: Determining flight frequencies on an airline network with demand-supply interactions, *Transportation Research part E*, 39, 417-441, 2003.
- 15) Patriksson, M. and Rockafellar, R.: A mathematical model and descent algorithm for bilevel traffic management, *Transportation Science*, Vol.36, No.3, pp.271-291, 2002.
- 16) Patriksson, M. and Rockafellar, R.: Sensitivity analysis of aggregated variational inequality problems, with application to traffic equilibria, *Transportation Science*, Vol.37, No.1, pp.56-68, 2003.
- 17) 竹林幹雄, 片山祐陽: 航空旅客輸送市場におけるネットワーク競争のモデル化: 多階層モデル, 土木計画学研究・講演集, 2003.(CD-ROM)
- 18) Takebayashi, M.: Network competition in air transport Market, ATRS annual meeting, 2004(CD-ROM).
- 19) Luo, Z., Pang, J.S. and Ralphs, D.: Mathematical Programming with Equilibrium Constraints, Cambridge University Press, 1997.
- 20) Cho, H.J., Smith, T. and Friesz, T.: A reduction method for local sensitivity analysis of network equilibria arc flow, *Transportation Research-B*, Vol.34, pp.31-51, 2000.
- 21) Mifflin, R.: A quasi-second-order proximal bundle algorithm, *Mathematical Programming*, 73, pp.51-72, 1996.
- 22) Dempe, S.: A bundle algorithm applied to bilevel programming problems with non-unique lower level solutions, *Computational Optimization and Applications*, 15, pp.145-166, 2000.
- 23) Outrata, J., Kocvara, M. and Zowe, J.: Nonsmooth approach to Optimization Problems with Equilibrium Constraints, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 24) Stor, M.: Nonsmooth trust region methods and their applications to mathematical programs with equilibrium constraints, Shaker Verlag, 2000.
- 25) Davis, G.: Exact local solution of the continuous network design problem via stochastic user equilibrium assignment, *Transportation Research-B*, Vol.28, No.1, pp.61-75, 1994.
- 26) Fudenberg, D. and Tirole, J.: The fat-cat effect, the puppy dog ploy, and the lean and hungry look, *American Economic Review*, Vol.74, No.2, 361-366, 1984.
- 27) 村上英樹: 米国国内市場におけるエアライン間の競争分析, 神戸大学経済経営研究所ワーキングペーパー, 2004.

ローコストキャリアの行動を考慮した航空旅客輸送市場のモデル化*

竹林幹雄**

本研究では現在の航空市場で行われているハブスプークキャリアとローコストキャリアの競争をMPECによりモデル化し、ハブキャリアの行動特性を明らかにすることを目的とする。まず、ハブキャリア、ローコストキャリアさらに利用者の3者の行動を最適化問題として定式化した。次にネットワーク競争がMPECによりモデル化可能であることを示し、一般化Jacobianを用いた最適性条件を導出するとともにバンドル・トラスト法による最適化アルゴリズムを提案した。最後に、3点間輸送を対象とした簡単な数値計算例から、ハブキャリアの行動がハブ空港における支配力に依存することが示唆された。

Model of Air Transport Market Concerning Low Cost Carrier's Behavior*

Mikio TAKEBAYASHI**

This paper presents the theoretical model for understanding the structure of contemporary network competition between airlines: in particular, the behavior of hub-spokes shaped network carrier against the low cost carrier is discussed. First, it is shown that the competition between hub-spokes shaped network carrier and the low cost carrier can be expressed as a class of "mathematical programming with equilibrium constraints: MPEC" and formulated as bi-level programming problem. Second, some numerical examples are carried out and the results suggest that the behavior hub-spokes shaped network carrier depends on its dominance at the hub airport.
