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*

Modeling of Network Competition in Air Transport Market: Multi-Level Model*

竹林幹雄**
By Mikio TAKEBAYASHI**

１．はじめに

1978 年の米国国内市場自由化は，米国内に多くのエアラインを誕生させた．その多くはハブ・スポーク型サービスを提供するエアラインである．彼らはハブ・スポーク型のネットワークを採用することで，1)運用コストを最小化，2)規模の経済・範囲の経済による旅客数，市場の拡大，を享受してきた [1)]．一方で，あえてハブ・スポーク型のサービスを行わないエアラインも存在する． 彼らは 2 地点間輸送を行い，現在でもそのほとんどが小都市間輸送を主とした小規模なエアラインである．その中で，短距離市場に集中的に参入し，低価格と多頻度運行によりシェアを伸ばしてきたのがノーフリル・キャリアと呼ばれる低価格運賃のキャリアである．1980 年代中期に，米国内のエアライン数は大幅に減少したが，ノーフリル・キャリアのいくつかは生き残った．ノーフリル・キャリアの中で最大の規模はサウスウェスト航空であるが，彼らは一貫した１フライト１価格というモノシリックサービスと 多頻度運行により，現在でもシェアを拡大し続けている．

一般的には，サウスウェスト型のサービスは短距離市場では規模の経済が働きにくいために，ハブ・スポーク型のエアラインに比べて有利であるとされてきた．しかし，近年ではこのノーフリル・キャリアの参入が，本来規模の経済性が働くためハブ・スポーク型のサービスを行うエアラインに有利になるといわれている中距離市場にも続き，市場の拡大を図っている．さらに，サウスウェスト型のノーフリル・キャリアは米国国内のみならず，EU市場にも登場している．アジアに目を向ければ，わが国でも既に参入したSky Mark Airlinesや，新たに参入するStar Asia Airlinesもノーフリルに分類される．また，東アジアにおいてもマレーシアに本拠をおくAir Asiaも同じくノーフリルであり，航空需要の飛躍的な伸張を背景として，今後アジアにおいてもノーフリル・キャリアの参入が相次ぐと想像される．

ハブ・スポーク型輸送を行うキャリアと2地点間輸送を行うキャリアの特性について理論的に言及した代表例としてはHendricksによる一連の研究が挙げられる[2)3)]．Hendricksはさまざまなケースを想定し検討を加えたが，ほとんどの場合，2地点間輸送と比較してハブ・スポーク型の輸送が規模の経済性を大いに発揮するため，優位であると結論付けている．しかし前述のようにハブ・スポーク型輸送ネットワークと相対する形で2地点間輸送はノーフリルという運行形式でその勢力を伸ばしつつある．単なる「すきま産業」とは結論付けられない状況にある．

このように，現在の航空輸送市場の新たな潮流となっているノーフリル・キャリアであるが，その行動や戦略が与える市場へのインパクトに関しては，実態調査などがなされている程度に留まる．換言すれば，ノーフリル・キャリアの行動を明示的に取り扱うことのできる数理計画モデルは，筆者の知る限り皆無である．特に，世界の航空旅客輸送市場のフロンティアとなるアジア市場の今後を考える上でも，このノーフリル・キャリアの行動を明示的に取り扱うことのできる分析・評価フレームを構築することは極めて重要である．

本稿はこのような問題意識に立ち，ノーフリル・キャリアとハブ・スポークキャリアとのネットワーク・サービスの異種性を考慮した市場モデルを開発するためのひとつの試論である．各キャリアおよび

*キーワーズ：ネットワーク競争，ノーフリル・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,
TEL078-803-6017，078-803-6017）

旅客の行動を均衡分析の枠組みを用いて定式化し，解析的な解法について言及する．

２．モデル

(1) 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エアラインと，２地点間輸送を行う（PP）エアラインである．HS キャリアはハブ空港を OD 交通量の多いゾーンに設定する．PP キャリヤはハブ空港を持たず，HS キャリアがハブを設置したエリアには HS キャリヤのハブ空港以外の空港に乗り入れるものとする．各キャリアは複数存在することを認めるが，表記を簡略化するため，以後特に断らない限り１社ずつ存在する場合を定式化する．

今，需要量がX_{ij}で与えられるij間ODマーケットで２種類のエアラインが参入する場合を取り上げる．市場では，HSキャリアが先行してサービスをはじめているため，市場で優位に行動できるものとする．PPキャリアはHSキャリアの市場優位性を考慮した上で，自らのサービスレベルを決定することとする．このような関係は，２層階層の市場としてモデル化することができる．

(2) HSキャリア

HSキャリヤは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．ここではある１キャリアの行動に限定してモデル化を行う．営業レグを$l\in \Theta^{HS}$(Θ^{HS}はHSの営業レグの集合をあらわす)で表す．HSキャリアはlでのフライト数f_l^{HS}および運賃p_l^{HS}を操作変数とすると考える．各リンクのHSキャリアの運行コストをC_l^{HS}，参入に要する固定費用を$C_l^{HS,\ FIX}$とすると，HSキャリアの直面する利潤最大化問題は以下のように記述できる．経路rを利用する旅客から運賃p_r^{HS}を徴収するとすると，

$$\begin{aligned} \max\ &: Z^{HS}(f_l^{HS}, p_l^{HS}) \\ &= \sum_{l\in\Theta^{HS}} (p_l^{HS} x_l^{HS} - f_l^{HS} C_l^{HS} - C_l^{HS,FIX}) \end{aligned} \quad (1)$$

Sub. To

$$x_l^{HS} \le V_l^{HS} f_l^{HS}, \quad for \quad \forall l\in\Theta^{HS} \quad (2)$$

$$\sum_{l\in\Theta^{PP}} f_l^{PP}\delta_l^h + \sum_{l\in\Theta^{HS}} f_l^{HS}\delta_l^h \le F_h \quad for \quad \forall h \quad (3)$$

$$f_l^{HS} \ge 0, \quad p_l^{HS} \ge 0, \quad for \forall l\in\Theta^{HS} \quad (4)$$

and PPキャリヤの最適化行動 (5)

ここで，(1)はHSキャリアの目的関数である．(2)は各営業レグでの供用座席数に関する制約であり，(3)は滑走路容量制約を表す．(4)は各操作変数の非負条件である．さらに，HSキャリアは前述のように市場で優位に行動できるため，先手として定義できる．すなわち，PPキャリアの最適化行動を評価し，自己の戦略を変えることができる．(5)はPPキャリアの最適化行動が最適制約としてHSキャリアの問題に組み込まれることを示している．

(3) PPキャリア

PPキャリアは後発のキャリアであるため，まずHSキャリアの市場優位性を考慮し，HSキャリアからできるだけ多くのシェアを奪うことをその目的とすると考えられよう．このとき，PPキャリアの運営する各路線では，収益が非負である必要がある．ゆえに，PPキャリアの行動は，平均費用で路線を運営し，シェアの拡大を行うというものである．すなわち，

$$\max : Z^{PP}(f_l^{PP}, p_l^{PP}) = \sum_{l\in\Theta^{pp}} x_l^{PP} \quad (6)$$

Sub. to

$$x_i^{PP} \le V_l^{PP} f_l^{PP}, \quad for \quad \forall l\in\Theta^{PP} \quad (7)$$

$$\sum_{l\in\Theta^{PP}} f_l^{PP}\delta_l^h + \sum_{l\in\Theta^{HS}} f_l^{HS}\delta_l^h \le F_h \quad for \quad \forall h \quad (3)$$

$$x_l^{PP} p_l^{PP} - C_l^{PP} f_l^{PP} - C_l^{PP,FIX} = 0 \quad (8)$$

$$f_l^{PP} \ge 0 \quad for \quad \forall l\in\Theta^{PP} \quad (9)$$

and 旅客の最適化行動 (10)

ここで，F_h:空港hでの滑走路容量をあらわす．式(6)はPPキャリアの目的関数を表す．(7)は路線容量の制約である．PPキャリアは常にHSキャリアより後発であるため，既にHSキャリアで占有されている分の滑走路容量を減じて利用せざるを得ないことを(7)は表している．(8)は平均費用制約であり，(9)はPPキャリアの運行便数の非負条件である．さら

にPPキャリアは旅客の最適化行動の制約条件となるため，(10)が導入される．

(3) 旅客

旅客は全て同じ属性であるとし，OD ペア rs の旅客は自己の不効用 u_{rs} を最小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) 総乗り入れ便数が f の空港では平均 $D(f)$の遅れが生じる．
2) 利用旅客数 x_l が路線容量に近づくほど，希望するフライトに乗れなくなる可能性が高くなるという見込み費用$\Gamma(x_l)$が増加する．

1)はキャリアの行動により生じる追加的費用であり，旅客は大幅な遅延が生じる空港は避けることが予想される．2)は路線容量に近づけば，希望するフライトに予約を取ることが難しくなり，不効用が増すことを考慮したものである．2)が導入されることにより，各路線を利用する際に生じる旅客の不効用は狭義凸関数になる．ゆえに，利用者均衡状態を仮定すれば，旅客の行動は以下のコスト最小化問題に帰着する．

$$\min U = \sum_{l\in\Theta^{HS} or \Theta^{PP}} \{\int_0^{x_l} (p_l + t_l + \sum_h D_h \delta_h^l)dw + \int_0^{x_l} \Gamma_l(w)dw\} \tag{11}$$

Sub.to

$$\sum_{rs,k} x_k^{rs} \delta_{rs,k}^l = x_l \tag{12}$$

$$X^{rs} = \sum_k x_k^{rs} \tag{13}$$

$$x_k^{rs} \geq 0 \tag{14}$$

(11)は目的関数であり，右辺第3項の積分コストがフローに依存して決定される．ただし，ここでは旅客はprice takerであることを仮定しているので，運賃p_lは旅客にとって与件となる．ゆえに(11)の右辺は前述のように狭義凸関数となり，ネットワークが確定されれば唯一の解を持つことがわかる．(12)はフローの保存を表し，(13)はODの保存を表す．

3．最適性条件

本モデルは均衡制約つき最適化問題(MPEC)[4]に分類されるものである.本モデルは3層構造となっているが,各層ごとに最適化問題を形成していることがわかる.ゆえに，通常の均衡制約つき最適化問題の解法アルゴリズムを援用することが可能であると考えられる．各階層の最適化問題は，全て上位の問題で決定される項目，ここではネットワーク形状,フライト頻度,運賃であるが，これらを与件として問題を構成することになる.このため，最上位の最適化問題であるHSキャリヤの戦略ごとに最適化問題がツリー化されていることになる．

各階層ごとの最適性条件を導出する．

まず旅客の最適化条件は，(11)右辺第 3 項の積分コストを最小化することから求められるため，通常の利用者均衡配分の解と一致する．ゆえに以下のように示すことができる．

$$if \quad x_k^{rs} \geq 0 \quad then \quad u_k^{rs} = u^{rs^*} \tag{15a}$$

$$if \quad x_k^{rs} = 0 \quad then \quad u_k^{rs} \geq u^{rs^*} \tag{15b}$$

ここで u^{rs^*}は OD ペア rs での最小コストである．また$\Gamma(x_l)$はリンクフローx_l に関して連続であるが,各フライトには明確な供給可能席数 $V_l f_l$ の制約が存在する．ゆえに$\Gamma(x_l)$は$\Gamma(V_l f_l - x_l)$という形式で定義される．しかし，この場合も本質的な違いはないので，(15)が旅客行動の最適性条件である．

次に PP キャリヤの最適性条件を導出する．(5)に対応する Lagrangean L^{PP} は次のように与えることができる．

$$\begin{aligned} L^{PP} &= Z^{PP} + \sum_h (F_h - \sum_{l\in\Theta^{PP}} f_l^{PP} \delta_l^h - \sum_{l\in\Theta^{HS}} f_l^{HS} \delta_l^h)\lambda_h \\ &+ \sum_{l\in\Theta^{PP}} (x_l^{PP} p_l^{PP} - C_l^{PP} f_l^{PP} - C_l^{PP,FIX})\mu_l \end{aligned} \tag{16}$$

なお，(6)に関する制約は，下位の旅客の問題で考慮されるので,ここでは制約条件として機能しない．このため，(16)には含んでいない．往復のフライト数が一致するとする．レグ l の復路運行を l'とすると，$f_l = f_{l'}$である．KKT を求めると，以下を得る．

$$\begin{aligned} \frac{\partial L^{PP}}{\partial f_l^{PP}} &= \frac{\partial Z^{PP}}{\partial f_l^{PP}} - 2(\lambda_h + \lambda_{h'\neq h}) + (\frac{\partial x_l^{PP}}{\partial f_l^{PP}} - C_l^{PP})\mu_l \\ &+ (\frac{\partial x_{l'}^{PP}}{\partial f_l^{PP}} - C_{l'}^{PP})\mu_{l'} = 0 \end{aligned} \tag{17a}$$

$$\frac{\partial L^{PP}}{\partial p_l^{PP}} = \frac{\partial Z^{PP}}{\partial p_l^{PP}} + (\frac{\partial x_l^{PP}}{\partial p_l^{PP}} p_l^{PP} + x_l^{PP})\mu_l + (\frac{\partial x_{l'}^{PP}}{\partial p_l^{PP}} p_l^{PP} + x_{l'}^{PP})\mu_{l'} = 0 \quad (17b)$$

$$\frac{\partial L^{PP}}{\partial \lambda_h} \geq 0, \quad \lambda_h \frac{\partial L^{PP}}{\partial \lambda_h} = 0 \quad (17c)$$

$$\frac{\partial L^{PP}}{\partial \mu_l} = 0 \quad (17d)$$

HS キャリアの均衡条件は

$$L^{HS} = Z^{HS} + \sum_h (F_h - \sum_{l \in \Theta^{PP}} f_l^{PP} \delta_l^h - \sum_{l \in \Theta^{HS}} f_l^{HS} \delta_l^h)\varphi_h \quad (18)$$

を用いて，KKT は以下のように得られる．

$$\frac{\partial L^{HS}}{\partial f_l^{HS}} = \frac{\partial Z^{HS}}{\partial f_l^{HS}} + (\frac{\partial x_l^{HS}}{\partial f_l^{HS}} - C_l^{HS})\varphi_l + (\frac{\partial x_{l'}^{HS}}{\partial f_l^{HS}} - C_{l'}^{HS})\varphi_{l'} = 0 \quad (19a)$$

$$\frac{\partial L^{HS}}{\partial p_l^{HS}} = \frac{\partial Z^{HS}}{\partial p_l^{HS}} + (\frac{\partial x_l^{HS}}{\partial p_l^{HS}} p_l^{HS} + x_l^{HS})\varphi_l + (\frac{\partial x_{l'}^{HS}}{\partial p_l^{HS}} p_l^{HS} + x_{l'}^{HS})\varphi_{l'} = 0 \quad (19b)$$

$$\frac{\partial L^{HS}}{\partial \varphi_h} \geq 0, \quad \varphi_h \frac{\partial L^{HS}}{\partial \varphi_h} = 0 \quad (19c)$$

ここで，$\partial L^{PP}/\partial \lambda=0$ であるとき，明らかに $\partial L^{HS}/\partial \psi=0$ である．

なお，それぞれのキャリアが複数存在する場合，同一階層間のキャリア間の均衡を考慮しなければならない．このとき，正規ナッシュ解など特定の解の成立を仮定する必要がある．

今，第1層のHSキャリヤの行動$\{\boldsymbol{f}_l^{HS}\}$が既知であるとして，2層以下の問題を考える．第3層の旅客の最適化行動に関するペナルティの重みをξ_3とし，それに対応するペナルティ関数を$Q(f_l^{PP}, x_l)$とする．

ペナルティ関数を導入した旅客の目的関数は，以下のように拡張される．

$$Z_{\xi}^{user}(f_l^{PP}, x_l) = U(f_l^{PP}, x_{ij}^k) + \xi_3 Q(f_l^{PP}, x_l) \quad (20)$$

すなわち，(20)の最適化が組み込まれた第 2 層の最適化問題は，次のように変更される．

$$\max : Z^{PP}(f_l^{PP}, p_l^{PP}) = \sum_{l \in \Theta^{pp}} x_l^{PP} \quad (6')$$

Sub. to (7)-(9) and

$$\nabla_{x_l} Z_{\xi}^{user}(f_l^{PP}, x_l) = 0 \quad for \ {}^{\forall} x_l \quad (21)$$

今，HS キャリアの行動が与えられた条件のもとでは，上記の問題は通常の非線形最適化問題の解法で対応することができる．PP キャリアのパラメトリック最適解を $Z^{PP\xi}(f_l^{PP},x_l)$，制約条件を関数化して示したものを $g^{1\xi}(f_l^{PP},x_l)$とすると，摂動理論により以下の関係式が導出される．

$$\begin{aligned}
&\nabla Z^{PP\xi}(f_l^{PP}, x_l) = \nabla_{f^{PP}} Z^{PP\xi}(f_l^{PP}, x_l) + \nabla_x Z^{PP\xi}(f_l^{PP}, x_l) \\
&* \nabla \omega^{PP}(f^{PP}) = \nabla_{f^{PP}} Z^{PP\xi}(f_l^{PP}, x_l) - \nabla_x Z^{PP\xi}(f_l^{PP}, x_l) \\
&* [\nabla_{xx}^2 Z_{\xi}^{user}(f_l^{PP}, x_l)]^{-1} \nabla_{f^{PP}x} Z_{\xi}^{user}(f_l^{PP}, x_l)
\end{aligned} \quad (22a)$$

$$\begin{aligned}
&\nabla g^{2\xi}(f^{PP}) = \nabla_{f^{PP}} g^{2\xi}(f^{PP}, x) - \nabla_x g^{2\xi}(f_l^{PP}, x_l) \\
&* [\nabla_{xx}^2 Z_{\xi}^{user}(f_l^{PP}, x_l)]^{-1} \nabla_{f^{PP}x} Z_{\xi}^{user}(f_l^{PP}, x_l)
\end{aligned} \quad (22b)$$

ただし $\boldsymbol{x}=\omega(\boldsymbol{f}^{PP})$であり，式中の $\boldsymbol{x}$ および $\boldsymbol{f}^{PP}$ はベクトルを表す．このような勾配を利用することで，第 2 層の最適解は求解される．同様の手順を第 1 層の問題に対しても適用することができる．このように HS キャリアのパラメトリック最適解を $Z^{HS\pi}(f_l^{HS}, f_l^{PP})$，第 1 層の制約条件を関数化して示したものを $g^{1\pi}(f_l^{HS},f_l^{PP})$とし，各段階で HS キャリアの戦略ごとにパラメトリック解を定めることができる．

5．おわりに

本稿ではノーフリル・キャリアの行動を取り入れたネットワーク競争モデルを定式化し，解法についてのべた．なお数値計算を通した分析は講演時に紹介することとしたい．

参考文献

1) Kanafani, A. et.al.: Airline hubbing: some implications for airport economics
2) Hendricks, K et.al.: Entry and exit in hub-spoke networks, RAND jnl. of Economics, Vol.28, No.2, 291-303, 1997.
3) Hendricks, K. et.al. : Equilibria in networks, Econometrica, Vol.67, No.6, 1407-1434, 1999.
4) Luo, Z et.al.: Mathematical Programming with Equilibrium Constraints, Cambridge University Press, 1997.