

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*

Modeling of Network Competition in Air Passenger Transport Market*

竹林幹雄**・片山裕陽***

By Mikio TAKEBAYASHI** and Michiharu KATAYAMA***

1. はじめに

近年，米国を中心として，低価格運行を主たる戦略として運行するローコスト・キャリア（以降LCキャリア）の台頭が著しい．Southwest Airlinesはその代表的存在である．一般的にLCキャリアは短距離市場に参入し，基本的に2点間輸送を行い，利益を上げると考えられてきたが，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．また欧州ではRyanairやGO/Easyjetといった欧州型LCキャリアが登場し，HS型のサービスを提供しつつ，高い収益性を実現している．一方，アジアではわが国をはじめとして数カ国にわずかながらLCキャリアが登場しているにとどまっている．しかし，今後の混雑空港での整備促進や域内自由化・規制の暫時緩和に従い，LCキャリアが台頭する可能性は十分考えられる．

このように今後の航空輸送市場の動向を考える上で，LCキャリアの行動を明示的に取り扱うことは極めて重要であるが，いくつかの実証研究¹⁾²⁾はなされているものの，2点間輸送のキャリア³⁾との競争を除けば，理論的研究はほとんど存在しない⁴⁾．

本論文は，2002年度に筆者が発表したLCキャリアの行動を取り上げた方法論⁵⁾を拡張したものである．特に，今回は旅客の行動をSUEタイプとし，標準的なMPEC問題として記述可能であることを示し，解法アルゴリズムを提案している．

*キーワード：ネットワーク競争，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，

TEL078-803-6017，078-803-6017）

***学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科

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HSキャリアと，HSキャリアと比較して低コストで運行可能なLCキャリアとが存在すると仮定する．HSキャリアはHSサービスを展開し，その運賃は各ODマーケットごとに決定できると仮定する．

一方，LCキャリアは2点間輸送を基本とし，乗り継ぎサービスも行うが，運賃は運行区間（リンク）ごとに与えられるものと仮定しよう．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交通量は与件であるとする．

(2) HSキャリア

HSキャリアは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．営業区間を $l \in \Theta^{HS}$ (Θ^{HS} はHSの営業区間の集合)で表す．HSキャリアは l でのフライト数 f_l^{HS} およびOD市場 rs での経路運賃 $p_{rs}^{k,HS}$ 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} ，路線維持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．

$$\begin{aligned} \max \quad & : Z^{HS} (f_l^{HS}, p_{rs}^{k,HS}) \\ & = \sum_{rs} \sum_{k \in \Omega^{HS}} p_{rs}^{k,HS} x_{rs}^k - \sum_{l \in \Theta^{HS}} f_l^{HS} C_l^{HS} \\ & \quad - C_l^{HS, FIX} \end{aligned} \tag{1}$$

Sub. To

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

$$p_k^{HS} \geq 0, \quad for \quad \forall k \in \Omega^{HS} \quad (3)$$

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

and LCキャリアの最適化行動 (5)

x_{rs}^k : OD市場 rs で k 番目のルートを取る旅客数, x_l^{HS} : HSキャリアの運行する路線 l でのリンクフロー. V_l^{HS} : 供給座席数. ω^{HS} : 最低ロードファクターを表す.

ここで, (1)はHSキャリアの目的関数である. (2)は各営業区間での供用座席数に関する制約および最低ロードファクター制約である. (3), (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LC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) LCキャリア

LCキャリアはHSキャリアと同様に収益の最大化を図るものとする. このとき, LCキャリアの価格設定に関しては, マークアップ率 η を導入して考えることとする. マークアップ率は外生的に与えられるものと仮定すると, LCキャリアの利潤最大化問題は

$$\begin{aligned} \max : & Z^{LC}(f_l^{LC}, p_l^{LC}) \\ = & \sum_{l \in \Theta^{LC}} (x_l^{LC} p_l^{LC} - f_l^{LC} C_l^{LC} - C_l^{FIX, LC}) \end{aligned} \quad (6)$$

Sub. to

$$x_l^{LC} \leq V_l^{LC} f_l^{LC}, \quad for \quad \forall l \in \Theta^{LC} \quad (7)$$

$$p_l^{LC} x_l^{LC} = (1 + \eta) (f_l^{LC} C_l^{LC} + C_l^{FIX, LC}), \quad for \quad \forall l \in \Theta^{LC} \quad (8)$$

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

ここで, f_l^{LC} : LCキャリア運行の区間 l での便数,

p_l^{LC} : LCキャリア運行の区間 l での運賃, x_l^{LC} : LCキャリア運行の区間 l でのリンクフロー, V_l^{LC} : 供給座席数, C_l^{LC} : 運行費用, $C_l^{LC, FIX}$: 固定費用を表す.

式(6)はLCキャリアの目的関数を表す. (7)は供給座席数制約, (8)は料金に関する制約である. (9)はLCキャリアの運行便数の非負条件である.

(3) 旅客

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⁵⁾⁶⁾. 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. 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れば, 旅客の均衡交通量は以下のように記述される.

$$x_{rs}^k = \frac{\exp\left[\theta\left\{-\nu p_{rs}^k - \alpha_{rs}^k - \tau \sum_h D_h \delta^{l,h}_{rs,k} - \sum_l \Gamma(x_l) \delta_{rs,k}^l\right\}\right]}{\sum_k \exp\left[\theta\left\{-\nu p_{rs}^k - \alpha_{rs}^k - \tau \sum_h D_h \delta^{l,h}_{rs,k} - \sum_l \Gamma(x_l) \delta_{rs,k}^l\right\}\right]} X_{rs} \quad (10)$$

X_{rs} : OD市場 rs におけるOD交通量, t_{rs}^k : OD市場 rs における経路の旅行時間であり, ラインホール時間と空港における平均フライト待ち時間で構成される.

$$t_{rs}^k = \sum_l (t_l + \frac{OPEN}{f_l}) \delta_{rs,k}^l$$

D_h : 乗り入れ空港 h でのデレイによる時間を表す.

$$D_h = \frac{\xi_h^1 \sum_{l \in \Theta^{HS} \text{ or } \Theta^{LC}} f_l}{F_h}$$

ξ と F_h は正のパラメータである. また, 見込み費用 $\Gamma(x_l)$ は

$$\Gamma(x_l) = \xi_l^2 \exp(\xi_l^3 \frac{x_l}{V_l})$$

と表されるものとする．

3．最適性条件

本モデルは均衡制約つき最適化問題(MPEC)に分類されるものである．しかし，最終的には旅客の行動の層に全て写像されるので，実質上2層の問題として通常のbi-levelプログラミングとして定式化することが可能である．以下，具体的に見ていこう．ここでは問題の構成がHSキャリアの価格問題と便数問題に分離されるが，手続きとしては全く同じであるため，便数問題のみを説明する．

通常の2階層問題として定式化すれば以下のようになる⁶⁾．

[MPEC-P]

$$\max_{f_l^{HS}} : Z^{HS}(f^{HS}, \hat{f}^{LC}(f^{HS})) \quad (11)$$

sub. to

$$g^{HS}(f^{HS}, \hat{f}^{LC}(f^{HS})) = 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & Z^{LC}(f^{HS}, \hat{f}^{LC}(f^{HS})) \\ & = \max_{f_l^{LC}} Z^{LC}(f^{HS}, f^{LC}) \end{aligned} \quad (13)$$

sub. to

$$g^{LC}(f^{HS}, f^{LC}(f^{HS})) = 0 \quad (14)$$

これから標準的な KKT を導出すると次のようになる．

[MPEC-D]

$$\max_{f_l^{HS}, f_l^{LC}} : Z^{HS}(f^{HS}, f^{LC}) \quad (15)$$

sub. to

$$g^{HS}(f^{HS}, f^{LC}) = 0 \quad (16)$$

$$\nabla_{f_l^{LC}} Z^{LC}(f^{HS}, f^{LC})^T + g^{LC} \varphi = 0 \quad \forall f_l^{LC} \quad (17)$$

$$g^{LC}(f^{HS}, f^{LC}(f^{HS})) = 0 \quad (14)$$

:ラグランジュ乗数である．

ここから標準的な MPEC として記述することを考えよう．式(14)のうちリンク容量制約部分は上位・下位双方の問題の制約として機能しているので非分離型の制約として機能していることがわかる．

一方，料金に関する制約は独立である．すなわち，実質的には(14)のリンクフロー制約は上位問題の制約として KKT を導出しても，最適化の際には影響がないことになる．このことを利用して，上位問題を独自の制約条件付きの最適化，下位問題を制約なし最適化問題として再構成し，開門代の目的関数を料金に関する項目のみペナルティ化して検討すると考えれば，その最適性条件である KKT は以下のよう構成されることになる．

$$\begin{aligned} \nabla \tilde{Z}^{HS} &= \nabla_{f^{HS}} Z^{HS}(f^{HS}, f^{LC}) + \psi \nabla_{f^{HS}} g^{HS}(f^{HS}, f^{LC}) \\ &\quad - \nabla_{f^{LC}} Z^{HS}(f^{HS}, f^{LC}) [\nabla_{f^{LC}}^{LC(P)} Z^{LC(P)}(f^{HS}, f^{LC})]^{-1} * [\nabla_{f^{HS} f^{LC}}^{LC(P)} Z^{LC(P)}(f^{HS}, f^{LC})^T] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$g^{HS}(f^{HS}, f^{LC}) = 0 \quad (12)$$

$$\psi g^{HS}(f^{HS}, f^{LC}) = 0 \quad (13)$$

$$\psi \geq 0 \quad (19)$$

$$\nabla_{f^{HS} f^{LC}}^{LC(P)} Z^{LC(P)}(f^{HS}, f^{LC})^T = 0 \quad (20)$$

ここで は新たに導入されたラグランジュ乗数である．以上のような手続きは価格を変数にした場合でも全く同様である．

以上の KKT を元にして，アルゴリズムを開発する．ここでは標準的な最適化である許容方向法に則った最適化方法を述べる．

【アルゴリズム】

STEP 0: 全体の繰り返し回数を w とし，便数最適化問題内での繰り返し回数を n とする．最初に制約条件を満足するような初期実行可能解を設定する．LC キャリアの価格が定まっていなければ価格をゼロとして初期配分の結果から初期の価格設定を行う．

STEP 1: 傾き, $\nabla \tilde{Z}^{HS}$ と ∇g^{HS} を計算する．

STEP 2: 以下の問題の解である方向 s を定める．

$$\min_{(s, \xi)} \xi$$

sub. to

$$\nabla \tilde{Z}^{HS} * s \leq \xi$$

$$\nabla \tilde{g}_i^{HS} * s \leq q_i \xi, \quad i \in I^{HS} = \{ i | g^{HS} = 0 \}$$

$$|s_i| \leq 1, \text{ for } \forall i$$

ここで f^{HS} は HS キャリアの制約の集合であり, q_i は制約を犯さないような安全係数である.

STEP 3: 最適解 ξ^* が $\xi^* \geq -\varepsilon_1$ の関係を満たすのであれば STEP 7 へ, そうでなければ STEP 4 へ移動する.

STEP 4: 以下の最小化問題を解き, ステップ幅 α を決定する.

$$\min \{ \tilde{Z}^{HS}(\mathbf{f}^{HS} + \alpha \mathbf{s}) \mid \tilde{\mathbf{g}}^{HS}(\mathbf{f}^{HS} + \alpha \mathbf{s}) \leq \mathbf{0} \}$$

そして $\mathbf{f}^{HS, n+1, w} = \mathbf{f}^{HS, n, w} + \alpha \mathbf{s}$ として更新する.

STEP 5: 問題(6)を制約付きで解を求める. そして

$\mathbf{f}^{HS, n+1, w}$ のもとで, $\mathbf{f}^{LC, n+1, w}$ と $\mathbf{p}^{LC, n+1, w}$ を定

める.

STEP 6: いま

$$|f^{l, n} - f^{l, n+1}| \leq \varepsilon_3 \text{ for } \forall l \in \Theta^{HS} \text{ or } \Theta^{LC}$$

かつ

$$|\tilde{Z}^{HS}(\mathbf{f}^{HS, n}) - \tilde{Z}^{HS}(\mathbf{f}^{HS, n+1})| \leq \varepsilon_4$$

が成り立てば, STEP 7 へ. そうでなければ繰り返し回数を $n+1$ に更新し, STEP 1 へもどる.

STEP 7: 便数が収束していれば, すなわち以下の条件が満たされていれば計算終了. そうでなければ価格問題に移動して計算を続行する.

$$|f^{l, w} - f^{l, w-1}| \leq \varepsilon_2 \text{ for } \forall l \in \Theta^{HS} \text{ or } \Theta^{LC}$$

4. 数値計算

ここではモデルの挙動を確かめるために数値計算を実行する. 以下のような3ゾーンに関する数値例を紹介する. なお, 設定は表-1, 表-2 に示すとおりである.

なお, 紙面の都合上計算結果は講演時に示すこととする.

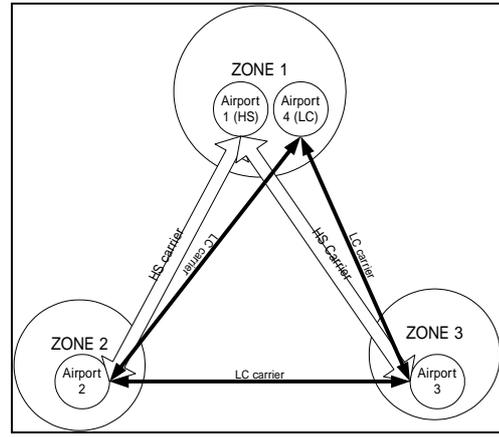


図 - 1 計算例

表 - 1 数値計算の設定

OD MATRIX			Linehaul time		
ZONE	1	2	3	HS	LC
1	0	100	100	10 for each link	10.5 for link 1-4
2	100	0	50		10 for link 5-6
3	100	50	0		value of F
Seat Availability			F1	300	
HS	7 for each flight		F2-F4	250	
LC	3 for each flight				
Cost Structure					
HS	Operation 25 for each flight				
	Fix	50 for each link			
LC	Operation scenario				
	Fix	25 for each link			

表 - 2 パラメータ

ω^{HS}	0.5	τ	0.01	ξ^1	1.05
ξ^2	0.35	ξ^3	0.8	θ	-0.05
v	1.7	OPEN	10	INIT	2

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) Vowles, T.M.: The "Southwest Effect" in multi-airport regions, *Jnl. of Air Transport Management*, 7, 251-258, 2001.
- 3) Hendricks, K et.al.: Entry and exit in hub-spoke networks, *RAND jnl. of Economics*, Vol.28, No.2, 291-303, 1997.
- 4) Adler, N: Competition in a deregulated air transportation market, *European Journal of Operational Research*, 129, 337-345, 2001.
- 5) 竹林幹雄: 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, 2002.
- 6) Takebayashi, M. and Kanafani, A.: Modeling of Network Competition in Air Transport Market, *Proc. of INFORMS Atlanta*, 2003 (in print).