市場厚の外部性と航空ネットワーク構造*

AIRLINE NETWORK STRUCTURE WITH THICK MARKET EXTERNALITY*

松島格也** ・Emine YETISKUL***・小林潔司****
by Kakuya MATSUSHIMA**, Emine YETISKUL**** and Kiyoshi KOBAYASHI*****

1. はじめに

本研究では，ポイント・トゥ・ポイント型（以下，PP 型と表す）ネットワーク企業が多頻度，低運賃の航空サービスを提供することにより市場厚の外部性が機能するメカニズムを分析する．業務活動に代表されるように，家計の時間制約が大きい場合，多数の活動の時間調整が必要となる．時間調整が不可能な場合には，トリップそのものを断念せざるを得なくなる．この場合，PP 型企業が多頻度・直行サービスを提供することにより，家計が時間調整を行う自由度が大きくなる．さらに，家計が往路と復路の双方において航空機を利用する場合，往路と復路の双方における時間調整の可能性が，トリップの生成やフライト選択に影響を及ぼす．すなわち，航空機の運航頻度が増加すれば，往路と復路における時間調整の自由度が同時に増加し，結果として航空サービス需要が増加する．このようなポジティブフィードバックが働き，結果として航空サービス市場に市場厚の外部性に伴う規模の経済性が働く．

2. 市場均衡モデル

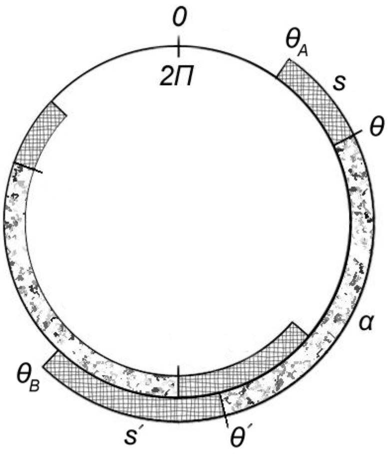
(1) 前提条件

独占航空サービス市場を考えよう．紙面の都合上 PP ネットワークのみを説明する．３つの都市 A, B, Cで構成される対称的ネットワークを考える．

*キーワーズ：交通行動分析，航空市場
**正員 博士(工) 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL 075-753-5072
kakuya@psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)
***学生員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻
****フェロー 工博 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

３つの都市間を移動する航空トリップのうち，都市Aに居住し，目的地である都市Cへ往復移動する家計のトリップに着目しよう．いま，都市Aから都市Cに移動する家計が，都市Cにおいて活動を開始する時刻を**図ー１**に示すような円環上の点で表現しよう．円環上の各点は，同図に示すような角度θを用いて表現される．過去から将来にわたる時間軸上の各点は$\theta \in (-\infty, \infty)$を用いて定義される．いま，都市$C$で時刻$\theta \in [0, 2\pi)$に活動を開始する潜在的家計に着目しよう．潜在的家計数はMであり，活動開始時刻は区間$[0, 2\pi)$上で一様に分布している．

さらに，都市Cで活動を開始した家計は一定時間にわたり都市Cに滞在したのちに都市Aに戻ることになる．さらに，記述を簡略化するために，目的地における滞在時間を0と仮定する．ここで，改めて家計の活動時刻をθで表すこととすれば，家計の活動時刻$\theta \in [0, 2\pi]$は**図ー２**に示す円環上に一様に分布することになる．さらに，家計の都市Cへのトリップ効用wに関しても異質性が存在し，トリップ効用は区間$[0, \overline{w}]$上で一様分布に従うと仮定する．トリップ効用に異質性が存在するため，航空会社の運賃政策がトリップ需要に影響を及ぼすことになる．家計は都市Cを訪問するトリップの前後に，都市Aにおいて別の活動の予定が入っている．都市Cへのトリップ前の活動の終了時刻と，トリップ終了後に次の活動の開始時刻がすでに決定されていると考える．いずれの家計も前の活動の終了時刻以前の往路トリップにおける出発と，次の活動の開始時刻より遅い帰宅は不可能であると仮定する．事前の活動の終了より早い時刻に出発する必要がある場合や，次の活動より遅い時間に帰宅する場合には，トリップそのものを取りやめると考える．航空企業がn本のフライトを等



図－１　時刻の分布

時間間隔で運行しており，飛行所要時間を f $(2\pi > f > 0)$ と表そう．各空港における混雑現象はとりあげない．フライト需要が円環上に一様に分布しているため，航空会社は円間上に等間隔に刻まれた各時刻にフライトを運行すると考える．

(2) 家計行動

家計は活動時刻θまでに都市Cに到着するように都市Aを出発する必要がある．さらに，当該家計は都市Aにおいて，フライト直前に別の活動を行う必要があり，**図－２**に示すように，少なくとも時刻$\theta_A = \theta - s$より早く都市Aを出発できないと考えよう．ここに，sは都市Aと都市Cにおける２つの活動の間に，都市間移動のために利用可能な時間（以下，往路移動可能時間と呼ぶ）を表している．往路移動可能時間sは個人によって異なり，区間$[0, \overline{s}]$上で一様分布に従っていると仮定する．往路移動可能時間sの間に，当該の個人が都市Cに到着可能でない場合，当該の個人は都市Aの活動を優先し，都市Cへのトリップ自体をキャンセルすると考える．同様に，復路に関しても，活動終了時刻θ'から遅くとも時刻$\theta_B = \theta' + s'$までに都市Aに戻らなければならない．ここに，s'を復路移動可能時刻と呼び，区間$[0, \overline{s}]$上で一様に分布すると仮定する．復路移動可能時間の範囲の中で都市Aから都市Cまで戻れない場合には，都市Aへのトリップ自体をキャンセルする．都市Cへのトリップをとりやめれば，往路と復路の双方のトリップが実現しない．都市$A-C$間のフライトダイヤを都市Cへの到着時刻を用いて

$$s_i = (i-1)\cdot\frac{2\pi}{n}(i = 1, \cdots, n) \tag{1}$$

と表現しよう．都市$A-C$間のフライト時間をfとすれば，当該フライトの都市Aの出発時刻は$d_i = s_i - f$ $(i = 1, \cdots, n)$と表せる．いま，都市Cにおける活動開始時刻がθの家計は，時刻θまでに都Cに到着するフライトの中でもっとも到着時刻が遅いフライトを利用すると考えよう．さらに，当該家計が利用するフライトの都市Cの到着時刻を$s^*_C(\theta)$，都市Aの出発時刻を$d^*_A(\theta)$と表そう．当該家計の帰路トリップにおいては，活動終了後，都市Cをもっとも早い時刻に出発するフライトを利用すると考えよう．さらに，当該家計が利用するフライトの都市Cの出発時刻を$d^*_C(\theta)$，都市Aへの到着時刻を$s^*_A(\theta)$と表そう．

活動時刻θが区間$[0, 2\pi/n)$に位置する家計を考えよう．さらに，この家計の往路移動可能時間がsであると考えれば，家計が目的にまでに移動可能であるためには$f+\theta \leq s$が成立することが必要である．フライトに対する需要が存在することを保証するために$\overline{s} > f$が成立すると仮定する．家計の効用関数を

$$U(\theta, w, p, n) = \begin{cases} Y + w - p & f + \theta \leq s \text{の時} \\ -\infty & f + \theta > s \text{の時} \end{cases} \tag{2}$$

と定義しよう．ここに，Yは一般化所得，wはトリップにより獲得する効用である．家計が目的地へのトリップを取りやめた時に獲得できる効用をYと表せば，家計が目的地へのトリップを行う条件は$U(\theta, w, p, n) \geq Y$と表せる．ここで，活動時刻が微小区間$[\theta, \theta + d\theta]$に含まれる家計を考えよう．さらに，これらの家計の往路移動可能時間sが，区間$[0, \overline{s}]$において一様分布するという仮定より，着目している家計のうち，往路が移動可能な家計の割合は

$$R(\theta)d\theta = \frac{\overline{s} - f - \theta}{\overline{s}}d\theta \tag{3}$$

と表せる．ここで，活動時刻θが区間$[0, 2\pi/n)$において一様分布するという仮定より，着目している区間$[0, 2\pi/n)$において，往路が移動可能な家計の割合は

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{n}} R(\theta)d\theta = \frac{2\pi(\overline{s} - f)}{\overline{s}}\frac{1}{n} - \frac{2\pi^2}{\overline{s}n^2} \tag{4}$$

と表せる．ここで，円環上のすべての区間$[(i-1)2\pi/n, 2i\pi/n)$ $(i = 1, \cdots, n)$に対して式(4)に関して集計すれば，往路に関してトリップ可能な家計の割合は

$$P(n,f,\overline{s}) = \frac{\overline{s}-(f+\frac{\pi}{n})}{\overline{s}} \tag{5}$$
と表すことができる．復路に関しても同様の関係が成立するため，さらに，トリップ効用が区間 $[0,\overline{w}]$ において一様分布に従って分布する場合，トリップの総生成数は次式で表せる．

$$\begin{aligned} X(\boldsymbol{\mu}) &= M\{P(n,f,\overline{s})\}^2 \int_0^{\overline{w}} \Pr(w-p \geq 0)dw \\ &= M\left\{\frac{\overline{s}-(f+\pi/n)}{\overline{s}}\right\}^2 \cdot \frac{\overline{w}-p}{\overline{w}} \end{aligned} \tag{6}$$

(3) 企業行動と市場均衡

航空企業は利潤最大化行動に従って運行本数 n および片道運賃 p を決定する．いま，航空機の容量制約がなく，１回の片道フライトにつき固定費用 d_p が必要となると仮定しよう．PP 企業の１利用家計あたりの可変費用を c_p と表す．各路線の輸送需要はすべて対称的であり，企業利潤は各路線の利潤の総和で表される．当該路線の利潤は

$$\pi(n,p) = \{2(p-c_p)X(\boldsymbol{\mu}) - 2nd_p\} \tag{7}$$
と表すことができる．したがって，全路線を対象とした企業の利潤最大化行動は

$$\max_{p,n}\{\Pi(p,n) = 3\pi(n,p)\} \tag{8}$$
と表される．任意の運行本数 n に対して，運賃 p に関する利潤最大化の１階条件は，

$$6M\left\{\frac{\overline{s}-(f+\frac{\pi}{n})}{\overline{s}}\right\}^2 \left(\frac{\overline{w}-2p+c_p}{\overline{w}}\right) = 0 \tag{9}$$
と表される．したがって，独占企業の利潤最大化行動により，最適運賃 p^* は

$$p^* = \frac{1}{2}(\overline{w}+c_p) \tag{10}$$
に決定される．さらに，最適運賃 p^* を用いれば，頻度 n に関する最適化条件は，

$$\frac{M\pi(\overline{w}-c_p)^2}{2\overline{s}^2\overline{w}}\{(\overline{s}-f)n-\pi\} = d_p n^3 \tag{11}$$
となる．式 (11) の左辺の n の係数 $\overline{s}-f$ は正であり，左辺は右上がりの直線となる．頻度に関する最適化条件 (11) を満たす最適解は，１）３つの解（うち２つは正，１つは負）を持つ場合，2) ２つ（正の解と負の解が１つずつ）の解を持つ場合，３）１つの負の解を持つ場合，の３通りが存在する．このうち最も大きい値を持つ解が最適解であることを示すことが出来る．

以上は航空会社が PP ネットワークを形成した場合のモデル化であるが，HS 型ネットワークを形成した場合にも若干の変更を加えることで同様にモデル化できる．その結果，最適運賃は

$$\overline{p}^* = \overline{q}^* = \frac{1}{2}(\overline{w}+c_h) \tag{12}$$
となり，頻度 m に関する最適化条件は

$$\frac{3M\pi(\overline{w}-c_h)^2}{4\overline{s}^2\overline{w}}\left\{\left(\overline{s}-\frac{4}{3}f\right)m-\pi\right\} = d_h m^3 \tag{13}$$
となる．ここに $\overline{q}$ はハブ空港経由のトリップに対する運賃である．

(4) 市場厚の外部性

需要を頻度に関して偏微分することにより

$$\frac{\partial X(n)}{\partial n} = \Upsilon\frac{1}{n^2}\left\{(\overline{s}-f)-\frac{\pi}{n}\right\} \geq 0 \tag{14}$$

$$\frac{\partial^2 X(n)}{\partial n^2} = \frac{\Upsilon}{n^3}\left\{-2(\overline{s}-f)+\frac{3\pi}{n}\right\} \tag{15}$$

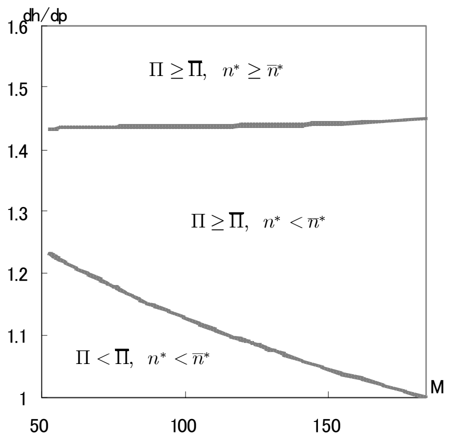
ただし，$\Upsilon = 2\pi M(\overline{w}-p^*)/(\overline{s}^2\overline{w})$ である．式 (15) より

$$\frac{\partial^2 X(n)}{\partial n^2} = \begin{cases} \geq 0 & \frac{3\pi}{2n} \geq \overline{s}-f \text{の時} \\ < 0 & \frac{3\pi}{2n} < \overline{s}-f \text{の時} \end{cases} \tag{16}$$

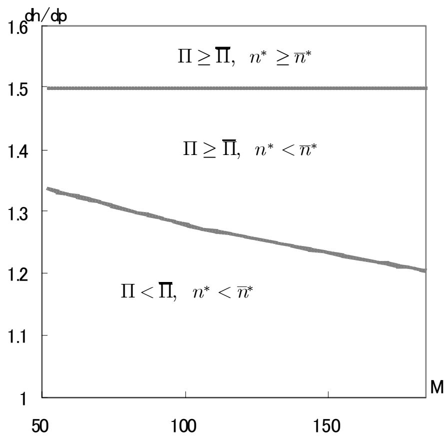
すなわち，$\frac{\pi}{\overline{s}-f} \leq n \leq \frac{3\pi}{2\overline{s}-f}$ の範囲においては規模の経済性がはたらくたが，$n \geq \frac{3\pi}{2\overline{s}-f}$ の範囲においてはもはや頻度に関する規模の経済性ははたらかない．これは，人々がそれほど忙しくない場合やレジャー目的のトリップのように，移動可能時間の上限値 $\overline{s}$ が十分大きい場合には，市場厚の外部性に伴う規模の経済性はそれほどはたらかず，逆にビジネス目的のトリップや多忙な人のように $\overline{s}$ が小さくなると市場厚の外部性に伴う規模の経済性がはたらくことを示している．近年市場参入した航空企業がターゲットとしているのは主としてビジネス客であり，彼らを対象とすることで規模の経済性を享受できる．

(5) 片道のみ制約がある場合

以下では，市場厚の外部性がはたらくことが航空ネットワークの選択行動にどのような影響を及ぼしているのかについて分析する．先に構築したモデルにおいては，往路・復路ともに出発時刻に制約がはたらくため，市場厚の外部性が機能していた．それに対し本節では，片道のみに時刻制約がはたらく状況



図－２　潜在的家計数とネットワーク



図－３　潜在的家計数とネットワーク（片道のみ制約）

を考える．これは，業務開始時刻のみが制約となるような家計を考え，往路のみに出発時刻の制約が存在する場合を仮定することに他ならない．往路のみの時刻制約を考慮しているため，家計の効用関数は

$$U(\theta, w, p_o, n_o) = Y + w - p_o \tag{17}$$

となる．ここにp_oは片道のみに制約がある場合の運賃を示す.（以降，下付添え字$_o$は片道のみの制約を考慮した場合を示す.）したがって，PP ネットワークを形成した場合，家計がトリップを行う条件は$w - p_o \geq 0$となる．時刻制約に関しては$\frac{\pi}{2n_o} + f \leq s$で表されるため，家計の時刻差$s$が一様分布に従って分布する場合，トリップの総生成数は次式で表せる.

$$X(\boldsymbol{\mu}_o) = M \frac{\overline{s} - (f + \pi/n_o)}{\overline{s}} \cdot \frac{\overline{w} - p_o}{\overline{w}} \tag{18}$$

ある単一路線の利潤は以下のようになる.

$$\pi_o(\boldsymbol{\mu}) = \{2(p_o - c_p)X(\boldsymbol{\mu}_o) - 2n_o d_p\} \tag{19}$$

価格p_oに関する一階条件より，最適運賃$p_o^*(n)$は

$$p_o^* = \frac{1}{2}(w + c_p) \tag{20}$$

に決定される．さらに式(20)を利潤(19)に代入して頻度n_oに関する最適化条件を求めると，

$$\frac{M\pi(p_o^*)^2}{4\overline{sw}} = d_p n_o^2 \tag{21}$$

となる．これより，最適フライト頻度は

$$n_o^* = \frac{p_o^*}{2}\sqrt{\frac{M\pi}{\overline{ws}d_p}} \tag{22}$$

と表される.

一方，HS ネットワークの場合も同様にして，最適運賃$\overline{p}_o^*, \overline{q}_o^*$は

$$\overline{p}_o^* = \overline{q}_o^* = \frac{1}{2}(\overline{w} + c_h) \tag{23}$$

に決定される．最適フライト頻度は

$$\overline{m}_o^* = \frac{\overline{p}_o^*}{2}\sqrt{\frac{6M\pi}{\overline{ws}d_h}} \tag{24}$$

と表される.

(6) 数値計算事例

以下では，各種パラメーターを適宜設定し数値計算を通じて最適解の挙動を分析する．**図－２**には，潜在的家計数を変化させた場合の利潤や運行本数の変化を示している．同図より，市場が厚くなるにつれて日帰りトリップの成立可能性が増加した影響がより効果的に影響し，PP ネットワークの優位性が増加していることが分かる.

一方**図－３**には，片道トリップを考慮した場合の潜在的家計数と利潤や運行本数との関係を示している．Mに関する傾向は基本モデルの場合と同様である．両図を比較することにより，往復トリップの実現可能性を考慮した基本モデルの方が，PP 型ネットワークを形成した方が利潤が大きく，また運行頻度も多くなっている領域が大きくなっていることが分かる．これは，往復のトリップ制約を考慮した場合の方がより市場厚の外部性が働くために，PP 型ネットワークの優位性がより大きくなっていることによる.

3. おわりに

本研究では，航空市場における手段補完性が航空会社のネットワーク形成行動に及ぼす影響について分析した．PP ネットワークで運行している新規参入航空会社は，頻度の経済性がはたらくことを活用して多頻度低運賃戦略をとりうることを説明した.