

協力と競合を考慮した 新規参入航空会社のネットワーク設計モデル

M2019SS001 日比野尋伯

指導教員：佐々木美裕

1 はじめに

輸送交通に関わるインフラは公共性が高く、長期的かつ安定的に運航されなければならない。一般的に、航空インフラは複数の会社によって支えられているが、会社間の競合による過度な競争は価格暴落や会社の共倒れの危険を伴うと考えられる。そのため、各会社は自社の利益を追求すると同時に、航空インフラを適切な協力関係の中で運航する必要がある。

航空ネットワーク設計を扱う数理モデルとして、O'Kelly[2] が提案したハブ・アンド・スポーク型ネットワークを前提とするモデルと Sasaki ら [4] が提案したハブ空港の配置を前提とせず、路線(枝)の開設によってネットワーク設計するモデルが存在する。前者には、複数の競合他社の存在を考慮したモデル [1] が既にあるが、後者にはまだない。

本研究では、PPANP(point-to-point based airline network design problem) [4] の拡張モデルとして、新規会社が既存会社と協力関係を持ちつつ自社の収益最大化を目的として路線開設を行う新規参入モデルを提案する。さらに、計算結果を比較することで既存会社と新規会社の協力の度合いがネットワークに及ぼす影響について分析する。

2 PPANP

既存の航空ネットワーク設計モデルの多くは、ハブ・アンド・スポーク型のネットワークを採用し、乗客の総移動距離の最小化を目的としてハブ空港を中心としたネットワークを構築する。一方、PPANP は、ハブ空港の設置を前提とせず、空港の配置と各空港間の OD 需要を所与として、空港間に路線(枝)を開設することによってネットワークを構築する航空ネットワーク設計モデルである。従来のハブ配置モデル、PPANP は共に、乗客は最大 2 ストップまでの経路を路線を乗り継いで利用する。しかし、従来のハブ配置モデルでは、乗客の利便性を考慮したものは少なく、遠回りを必要とする経路であってもすべての乗客が利用してくれるという仮定があるのに対して、PPANP では利便性の低い経路の乗客は少ないという仮定がある。また、PPANP では、1 つの OD ペア間に複数の利用可能な経路が存在するときは、経路コスト(移動コスト+乗り換えコスト)が最小の経路のみを利用すると仮定する。移動コストは、各経路の移動距離に比例するとし、本研究では単純にこれを用いる。乗り換えコストは [3] に従い、乗り換えのために発生する空港での待ち時間をその間に移動できる距離に換算する。また、経路に魅力度を設定し、この値が大きい経路ほど利用者が多いと仮定する。ここで、経路の魅力度は、その経路の起終点間の直線距離に

する経路コストによって決まるものとする。PPANP では、顕在需要を最大化を目的とすることによって、会社の収益と乗客にとって利便性の高いネットワークの双方を考慮したネットワークの構築が期待できる。

3 経路の迂回率と魅力度

本節では、PPANP が用いる仮定の 1 つにある経路の魅力度について説明する。PPANP では経路の利便性を、乗り換えコスト・迂回率・魅力度を用いて定義している。また、経路の利便性は経路に対する乗客の魅力度に従うと仮定する。まず、 h_{ij} , s_{ij} , D_{ij} を

h_{ij} : OD ペア (i, j) 間にかかる乗り換えコスト。

s_{ij} : OD ペア (i, j) 間の旅行距離。

D_{ij} : OD ペア (i, j) 間の直線距離。

とし、OD ペア (i, j) 間の迂回率を

$$r_{ij} = \frac{s_{ij} + h_{ij}}{D_{ij}} - 1$$

と定義する。経路の迂回率は、直線距離に対する乗り換えコストを含めた実際の移動距離の迂回の程度を示す指標である。この迂回率を用いて、経路の魅力度を

$$a_{ij} = \max \left\{ -\frac{1}{\beta} (r_{ij})^2 + 1, 0 \right\}$$

と定義する。魅力度は経路に対する乗客の魅力の程度を示し、経路の迂回率の増加に応じて図 1 のように減少する。 β は、迂回率に対する乗客の感度の大きさを表すパラメータであり、小さい方が感度が高く、経路の迂回率の増加に応じて経路の魅力度が減少しやすいことを示す。魅力度は 0 から 1 の値をとり、PPANP では顕在化する需要の割合として使われる。

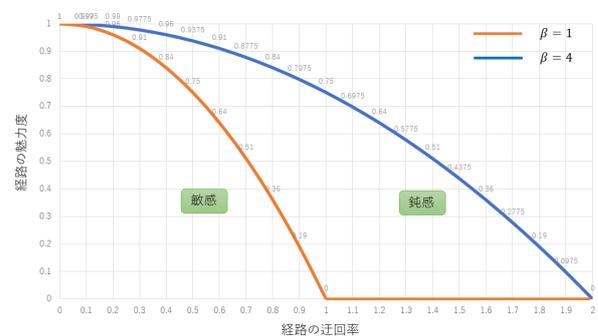


図 1 経路の迂回率による魅力度の変化

4 新規会社の参入モデル

本研究では、PPANP の拡張モデルとして、既存会社の路線配置を所与とする航空市場へ 1 社の新規会社が参入

するモデルを提案する。新規会社は、既存会社の既得権益を一定以上保障することを条件に市場に参入を許されることとし、自社の収益最大化を目的として路線を新たに開設する。PPANPと同様に、乗客は、最大2回まで乗り換えて目的地へ移動し、途中で他社路線への乗り換えも可能とする。他社路線への乗り換えコストを高く設定すると、他社路線への乗り換えを含む経路の魅力度は低くなり、その経路の乗客は減る。逆に、低く設定すると、他社路線への乗り換えを必要とする経路も利用されやすくなる。前者の場合、2社は競合関係にあり、後者の場合、2社は協力関係にあると言える。提案するモデルでは、乗り換えコストの設定により、2社の協力または競合を重視したネットワーク設計が可能である。

5 新規参入モデルにおける経路の迂回率と魅力度

新規参入モデルでは、同じ会社の路線への乗り換えコストと他社路線への乗り換えコストを区別し、次のように定義する。

h^s : 同会社内の路線への乗り換えコスト。

h^t : 他社路線への乗り換えコスト。

さらに、 e_{ij} を

$$e_{ij} = \begin{cases} 1: \text{既存会社が路線 } (i, j) \in A \text{ を既に開設して} \\ \text{いるとき。} \\ 0: \text{上記以外。} \end{cases}$$

と定義すると、 $|e_{ik} - e_{kj}|$ と $|e_{ik} - e_{kl}| + |e_{kl} - e_{lj}|$ は、それぞれ次の値をとる。

$$|e_{ik} - e_{kj}| = \begin{cases} 1: 1 \text{ ストップパスにおいて、他社路線へ1回乗り} \\ \text{換えるとき。} \\ 0: 1 \text{ ストップパスにおいて同じ会社の路線へ乗り} \\ \text{換えるとき。} \end{cases}$$

$$|e_{ik} - e_{kl}| + |e_{kl} - e_{lj}| = \begin{cases} 2: 2 \text{ ストップパスにおいて、他社路線へ2回乗り} \\ \text{換えるとき。} \\ 1: 2 \text{ ストップパスにおいて、他社路線、同じ会社の} \\ \text{路線へ、共に1回乗り換えるとき。} \\ 0: 2 \text{ ストップパスにおいて、同じ会社の路線へ2回} \\ \text{乗り換えるとき。} \end{cases}$$

よって、同じ会社の路線への乗り換えコストと他社路線への乗り換えコストを区別したときの1ストップパスの迂回率 r_{ijk}^1 と2ストップパスの迂回率 r_{ijkl}^2 は、 $t_{ijk}^1 = |e_{ik} - e_{kj}|$, $t_{ijkl}^2 = |e_{ik} - e_{kl}| + |e_{kl} - e_{lj}|$ とすると、それぞれ次のように定義できる。

$$r_{ijk}^1 = \frac{s_{ij} + (1 - t_{ijk}^1) h^s + t_{ijk}^1 h^t}{D_{ij}} - 1$$

$$r_{ijkl}^2 = \frac{s_{ij} + (2 - t_{ijkl}^2) h^s + t_{ijkl}^2 h^t}{D_{ij}} - 1$$

1ストップパスの魅力度 a_{ijk}^1 と2ストップパスの魅力度 a_{ijkl}^2 は、PPANPと同様に、それぞれ次の式で定義する。

$$a_{ijk}^1 = \max \left\{ -\frac{1}{\beta} (r_{ijk}^1)^2 + 1, 0 \right\}$$

$$a_{ijkl}^2 = \max \left\{ -\frac{1}{\beta} (r_{ijkl}^2)^2 + 1, 0 \right\}$$

6 収益分配率

他社乗り換えを含む経路から得られる収益は、2社で分配する必要がある。このモデルでは、経路の収益を各社の運航する路線の距離の比で分配するものとする。このとき各社の得られる収益の割合を収益分配率として定義する。ここで、経路を構成する各枝を開設する会社が与えられたとき、各経路における各社の収益分配率が計算できる。1ストップパス $i-k-j$ の既存会社と新規会社の収益分配率を、それぞれ s_{ijk}^{A1} , $s_{ijk}^{B1} (= 1 - s_{ijk}^{A1})$ とする。同様に、2ストップパス $i-k-l-j$ の既存会社と新規会社の収益分配率を、それぞれ s_{ijkl}^{A2} , $s_{ijkl}^{B2} (= 1 - s_{ijkl}^{A2})$ とする。収益分配率の式は、以下のように表すことができる。

$$s_{ijk}^{B1} = \frac{d_{ik}(1 - e_{ik}) + d_{kj}(1 - e_{kj})}{d_{ik} + d_{kj}}$$

$$s_{ijk}^{A1} = 1 - s_{ijk}^{B1}$$

$$s_{ijkl}^{B2} = \frac{d_{ik}(1 - e_{ik}) + d_{kl}(1 - e_{kl}) + d_{lj}(1 - e_{lj})}{d_{ik} + d_{kl} + d_{lj}}$$

$$s_{ijkl}^{A2} = 1 - s_{ijkl}^{B2}$$

さらに、1ストップパス $i-k-j$ の収益は既存会社と新規会社で $s_{ijk}^{A1} : s_{ijk}^{B1}$ に分配するとし、同様に2ストップパス $i-k-l-j$ の収益は $s_{ijkl}^{A2} : s_{ijkl}^{B2}$ に分配する。

7 定式化

はじめに、以下のように記号を定義する。

N : 空港(ノード)の集合。

A : 有向枝の端点ペアの集合。

$$A = \{(i, j) \mid i \in N, j \in N, j \neq i\}.$$

Π : ODペアの集合。 $\Pi = \{(i, j) \mid i \in N, j \in N, j > i\}$ 。

T_{ij}^1 : $(i, j) \in \Pi$ 間の1ストップパスにおいて経由可能な空港の集合。 $T_{ij}^1 = \{k \mid k \in N, k \neq i, k \neq j\}$ 。

T_{ij}^2 : $(i, j) \in \Pi$ 間の2ストップパスにおいて経由可能な空港ペアの集合。 $T_{ij}^2 = \{(k, l) \mid k \in N, l \in N, k \neq l, k \neq i, k \neq j, l \neq i, l \neq j\}$ 。

m : 開設する路線(枝)の本数。

d_{ij} : 路線 $(i, j) \in A$ の開設で得られる単位量あたりの収益。

w_{ij} : ODペア $(i, j) \in \Pi$ 間の潜在需要。

m : 新規会社が開設する路線(枝)の本数。

α : 既存会社の収益を保証する割合。

E : 新規会社参入前に既存会社が持つ収益。

a_{ijk}^1 : 1ストップパス $i-k-j$ の魅力度.

$$(i, j) \in \Pi, k \in T_{ij}^1, 0 \leq a_{ijk}^1 \leq 1.$$

a_{ijkl}^2 : 2ストップパス $i-k-l-j$ の魅力度.

$$(i, j) \in \Pi, (k, l) \in T_{ij}^2, 0 \leq a_{ijkl}^2 \leq 1.$$

次に、以下の決定変数を導入する.

$$x_{ijkl} = \begin{cases} 1: 2 \text{ストップパス } i-k-l-j \text{ が利用可能なとき.} \\ (i, j) \in \Pi, (k, l) \in T_{ij}^2. \\ 0: \text{上記以外.} \end{cases}$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1: 1 \text{ストップパス } i-k-j \text{ が利用可能なとき.} \\ (i, j) \in \Pi, k \in T_{ij}^1. \\ 0: \text{上記以外.} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1: \text{ノンストップパス } (i, j) \in A \text{ が利用可能な} \\ \text{とき.} \\ 0: \text{上記以外.} \end{cases}$$

新規参入モデルは次のように定式化できる.

$$\max. \sum_{(i,j) \in \Pi} d_{ij} w_{ij} \left(\sum_{(k,l) \in T_{ij}^2} a_{ijkl}^2 s_{ijkl}^{B2} x_{ijkl} + \sum_{k \in T_{ij}^1} a_{ijk}^1 s_{ijk}^{B1} y_{ijk} + z_{ij} \right) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{(k,l) \in T_{ij}^2} x_{ijkl} + \sum_{k \in T_{ij}^1} y_{ijk} + z_{ij} + e_{ij} \leq 1, \quad (i,j) \in \Pi \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in \Pi} d_{ij} w_{ij} \left(\sum_{(k,l) \in T_{ij}^2} a_{ijkl}^2 s_{ijkl}^{A2} x_{ijkl} + \sum_{k \in T_{ij}^1} a_{ijk}^1 s_{ijk}^{A1} y_{ijk} + e_{ij} \right) \geq \alpha E \quad (3)$$

$$x_{ijkl} \leq z_{ik} + e_{ik}, \quad (i,j) \in \Pi, (k,l) \in T_{ij}^2 \quad (4)$$

$$x_{ijkl} \leq z_{kl} + e_{kl}, \quad (i,j) \in \Pi, (k,l) \in T_{ij}^2 \quad (5)$$

$$x_{ijkl} \leq z_{ij} + e_{ij}, \quad (i,j) \in \Pi, (k,l) \in T_{ij}^2 \quad (6)$$

$$y_{ijk} \leq z_{ik} + e_{ik}, \quad (i,j) \in \Pi, k \in T_{ij}^1 \quad (7)$$

$$y_{ijk} \leq z_{kj} + e_{kj}, \quad (i,j) \in \Pi, k \in T_{ij}^1 \quad (8)$$

$$z_{ij} = z_{ji}, \quad (i,j) \in \Pi \quad (9)$$

$$\sum_{(i,j) \in \Pi} z_{ij} \leq m \quad (10)$$

$$x_{ijkl} \in \{0, 1\}, \quad (i,j) \in \Pi, (k,l) \in T_{ij}^2 \quad (11)$$

$$y_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad (i,j) \in \Pi, k \in T_{ij}^1 \quad (12)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (i,j) \in A. \quad (13)$$

目的 (1) は新規会社の収益の最大化を意味する. 制約 (2) は各 OD ペア間で利用可能な経路は高々1つであることを示す. 制約 (3) は、既存会社の収益を新規会社参入前の α 倍以上とする制約である. 制約 (4), (5), (6) は、枝

$(i,k) \in A, (k,l) \in A, (k,j) \in A$ が開設されたとき、2ストップパス $i-k-l-j$ が利用可能になることを示す. 同様に制約 (7), (8) は、枝 $(i,k) \in A, (k,j) \in A$ が開設されたとき、1ストップパス $i-k-j$ が利用可能になることを示す. 制約 (9) は、枝 $(i,j) \in A$ が双方向に利用できることを示す. 制約 (10) は、最大 m 本の路線を開設することを示す. 制約 (11), (12), (13) は決定変数がバイナリ変数であることを意味する.

8 計算実験と考察

ハブ配置問題のベンチマークデータとして知られている CAB データを用いて、Gurobi Optimizer 9.0 により最適解を計算した. CAB データは、アメリカ 1970 年の主要 25 空港の OD 需要データだが、計算時間の都合上、10 空港のみを用いる. 既存会社の初期路線配置には、収益の多い路線を 9 本開設したネットワークを用いた. 赤い線が既存会社が開設した路線であり、青い線が新規会社が開設する路線である. ここで、既存会社が開設した路線の本数を m_A 、新規会社が開設する路線の本数を m_B とし、 $(m_A, m_B) = (9, 9)$ で計算した. また、乗り換えコストは、 $(h^s, h^t) = (0, 0)$ (図 2, 3, 4) と $(h^s, h^t) = (0, 800)$ (図 5, 6, 7) の 2 つの組み合わせで最適解を求めた. 図 2 は、 $h^t = 0$ の 2 社が協力的なケースであり、図 5 は、 $h^t = 800$ という比較的、非協力的なケースである. どちらも新規会社はサービスの提供されていない空港を中心にネットワークを構築した. 図 3, 6 は、それぞれノンストップパス、1ストップパス、2ストップパスの利用者数を示す. また、図 4, 7 は、迂回率ごとの経路の利用者数を示す. これらの図を比較すると、他社路線への乗り換えコストが大きい場合、迂回率が大きく、より不便な経路の利用者が増えていることが分かる.

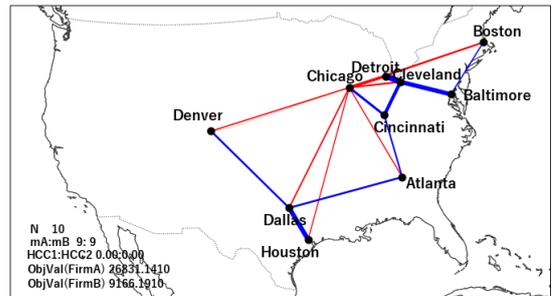


図 2 $(h^s, h^t) = (0, 0), (m_A, m_B) = (9, 9)$

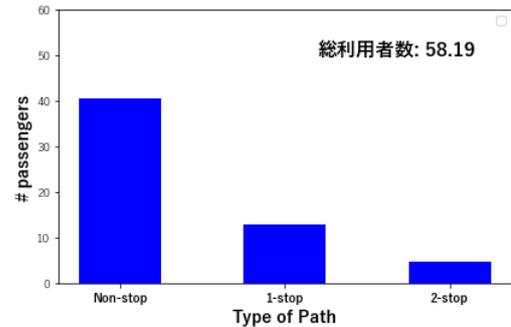


図 3 $(h^s, h^t) = (0, 0), (m_A, m_B) = (9, 9)$

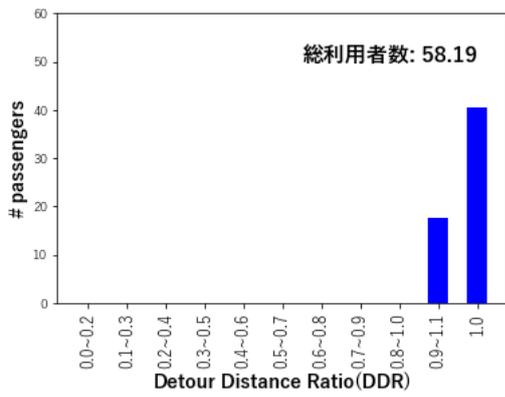


図 4 $(h^s, h^t) = (0, 0), (m_A, m_B) = (9, 9)$

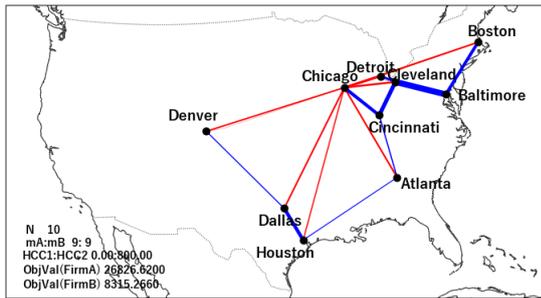


図 5 $(h^s, h^t) = (0, 800), (m_A, m_B) = (9, 9)$

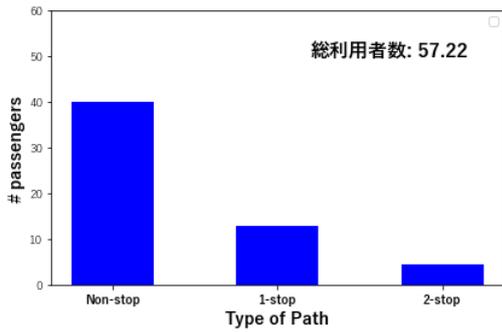


図 6 $(h^s, h^t) = (0, 800), (m_A, m_B) = (9, 9)$

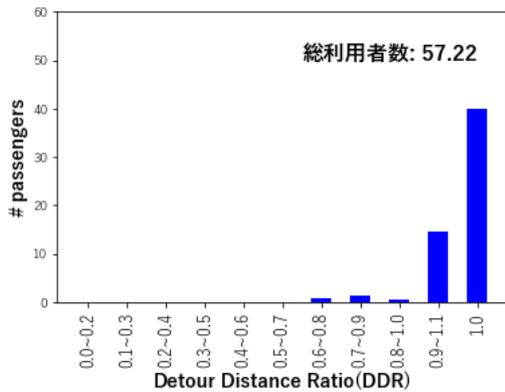


図 7 $(h^s, h^t) = (0, 800), (m_A, m_B) = (9, 9)$

図 8 は、 h^t による各社の収益の変化を表している。赤い折れ線グラフが既存会社の収益の変化であり、青い折れ線グラフが新規会社の収益の変化を示す。 $(m_A, m_B, h^S) = (9, 9, 0)$ のとき、それぞれ h^t の値が、0, 400, 800, 1765, 3530 のときの収益を計算した。新規会社の収益は h^t の値が増えるほど減少し、既存会社の収益は h^t の値が小さいほど、わずかに増加する結果となった。

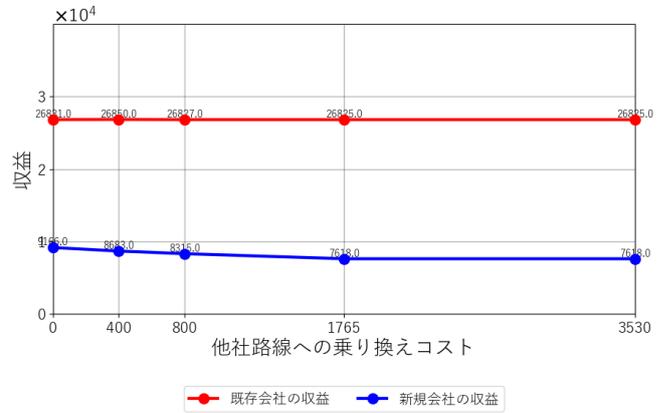


図 8 h^t による収益の変化

9 おわりに

他社路線への乗り換えコストによって協力と競争を考慮した新規会社の参入モデルを提案し、ベンチマークデータを用いて最適解を求めた。その結果、他社路線への乗り換えコストが小さいケースでは、お互いの路線を利用した経路が増え、2社の収益を共に増加させる結果が得られた。逆に、他社路線への乗り換えコストを大きく設定するほど、新規会社は自社だけでなるべく収益を大きくするようなネットワークを構築する傾向が見られた。今後の課題として、会社間の過剰な協力が乗客にとっての利便性に悪影響を与えるモデルへの改良が挙げられる。

参考文献

- [1] V. Marianov, D. Serra, and C. ReVelle. Location of hubs in a competitive environment. *European Journal of Operational Research*, Vol. 114, pp. 363–371, 1999.
- [2] M.E. O’Kelly. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, Vol. 32, pp. 393–404, 1987.
- [3] M. Sasaki and J.F. Campbell. The role of competition in airline hub network design. *Proceedings of 24th Annual Conference of Applied Regional Science Conference in Nagoya*, p. 20, 2010.
- [4] M. Sasaki and T. Furuta. Point-to-point based airline network design problems. *Proceedings of International Symposium on Scheduling 2017*, pp. 174–179, 2017.