

メガキャリアとの競合を考慮した LCCの航空路線編成モデルの研究

M2011MM057 齊木和弥

指導教員：佐々木美裕

1 はじめに

近年、航空の自由化により、日本の航空市場には、格安航空会社（以下、LCC）が参入し、競争が激化している。LCCは、一般的に大規模航空会社（以下、メガキャリア）より、保有機数やクルーの人数が少ないため、効率よく路線を運航する必要がある。そのため、LCCは拠点空港（以下、ハブ空港）を設置し、ハブ空港から他の複数の空港へ路線を運航していることが多い。例えば、スカイマーク株式会社 [9] では、神戸空港を拠点とし、新千歳空港、茨城空港、羽田空港、長崎空港、鹿児島空港、那覇空港へ路線を運航している。LCCにとって、最適なハブ空港の配置と各路線の運航便数を決定することは、重要な課題である。

ハブ空港の最適配置がオペレーションズ・リサーチの問題として扱われるようになったのは、米国の航空規制緩和から8年後の1986年のことである。O'Kelly [6] が、与えられたハブ空港候補から、総輸送費用を最小化する p 個のハブ空港を選択するモデルを提案している。この論文を皮切りにハブ空港配置モデルが研究で進められて四半世紀になる。この研究を基礎として、拡張したハブ配置モデルが提案されている [8]。しかし、その多くは常に意思決定者がマーケット全体を独占できると暗に仮定している。つまり、ハブ空港の配置にかかわらず、必ず1つの会社がすべての利用者を獲得できると言うことである。しかし、実際には、複数のサービスが複数の会社から提供され、利用者が自分にとって都合のよいサービスを選ぶのは当然である。このような状況を反映するために、競合ハブ配置モデルを考えることは重要である。

競合の要素をモデルに入れることにより、利用者の好みをどのように反映するかという問題が浮上する。Marianovら [4] は all-or-noting 規則割り当てを用いて、新たにハブ空港を設置してサービスを提供する際、すでに参入している競合会社よりも輸送コストが安くなる OD ペアに関して、乗客を全て獲得することができるものと仮定している。しかし、一般的には、人それぞれサービスに対する満足度が違うため、すべての人が同じサービスを利用するとは限らない。そこで、佐々木ら [7] は、利用者が航空会社を選択するモデルとして、サービスの不便度に関するロジットモデル [1] を導入した。サービスの不便度は、直行便で目的地まで行く際の距離に対するハブ空港経由の移動距離で定義している。先手である1つの大規模な航空会社とそれに追従する複数の中小規模の航空会社が互いに利益最大化を目的にハブを配置するモデル（シュタツケルバルク型ハブ配置モデル）を提案している。一般に競合の航空ネットワークの研究では、利用者配分にロジットモデルがしばしば使われることがある。しか

し、実際にパラメータの値を推定し、最適化している研究は少ない。また、このようなハブ配置モデルの研究はアメリカを研究対象としたものが多く、日本を対象としているものが少ない。

2 モデルの説明

本研究では、メガキャリアとの競合を考慮したLCCの航空路線編成モデルを考える。メガキャリアのみが参入している日本の航空市場を対象とし、LCCが利益最大を目的に新規参入する場合の「ハブ空港の配置と各路線への運航便数を決定する問題」をモデル化する。LCCは、ハブ空港から路線を運航することとする。利用者は、路線ごとにLCCかメガキャリアいずれかを選択し、利用者配分にはロジットモデル [1] を使用する。また、ハブ空港の候補は既存の日本の79の空港とし、容量制約はないものとする。さらに、ハブでない空港は、複数のハブ空港へ接続可能とする。また、LCCが運航可能な路線は79の空港間を結ぶすべての路線とし、各路線の運賃とLCCの運航便数は所与とする。

既存の競合ハブ配置モデルでは、上述したように、利用者配分にロジットモデルを使用しているものが多い。しかし、そのほとんどがロジットモデルのパラメータを1として利用者配分率を決定している。本研究では、運賃、運航便数、乗客数の実データを用いて、パラメータを推定したうえで、路線ごとにメガキャリアかLCCいずれかを選択するためのロジットモデルを構築し、利用者配分を求める。つまり、運航便数と運賃の情報が与えられたときに、利用者はメガキャリアかLCCいずれかを決定することを意味している。推定したロジットモデルを使用し、LCCのハブ空港の配置と各路線の運航便数を決定する問題を定式化し、計算機実験を行う。この問題は非線形計画問題であるので、複数の初期解を生成をし、最適化を行う。

ここで、本研究では、メガキャリアを日本航空株式会社、全日本空輸株式会社とし、LCCをスカイマーク株式会社、北海道国際航空株式会社、株式会社スターフライヤー、アイベックスエアラインズ株式会社、株式会社フジドリームエアラインズとして、データを入手した。

3 研究対象地域とデータ

図1は、本研究で対象とする79の空港を地図上にプロットしたものである。路線ごとの需要と1日の運航便数は、平成22年度航空輸送統計年報 [3] を用いる。メガキャリアの運賃は日本空輸株式会社の普通運賃 [5] を、LCCの運賃はスカイマーク株式会社の普通運賃 [9] を用いる。

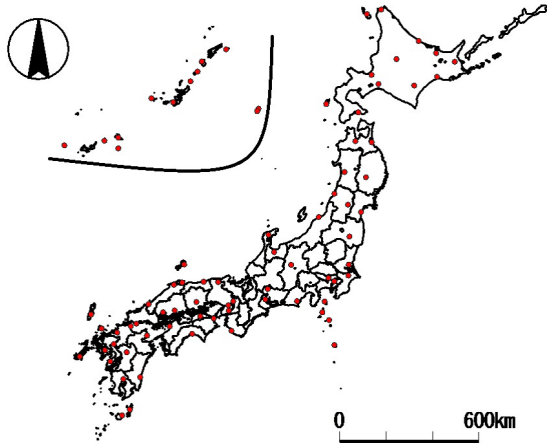


図1 対象とする79の空港

4 LCCとメガキャリアの利用者配分率の決定

本節では、LCCとメガキャリアの利用者配分率を求める。利用者は、メガキャリアとLCCいずれかをロジットモデル[1]に従って選択すると仮定する。

4.1 ロジットモデル

はじめに、次の記号を定義する。

P_i : 航空会社 i の利用者割合

V_j : 航空会社 j の効用関数

X_{kj} : 航空会社 j における k 番目の説明要因

$\beta_1 \sim \beta_k$: 適当なパラメータ

ロジットモデルは以下の式で表すことができる。

$$P_i = \frac{e^{V_i}}{\sum_j e^{V_j}} \quad (1)$$

$$V_j = \sum_k \beta_k X_{kj} \quad (2)$$

選択肢はLCCとメガキャリアの2つ ($i = 1, 2$) であるので、2項ロジットモデルを使用する。関係式は、次式のようになる。

$$P_1 = \frac{e^{V_1}}{e^{V_1} + e^{V_2}} = \frac{1}{1 + e^{-(V_1 - V_2)}} \quad (3)$$

$$P_2 = 1 - P_1 \quad (4)$$

このように2項ロジットモデルでは、2つの選択肢の効用の差だけで選択確率が表される。

4.2 2項ロジットモデルとパラメータの推定

LCCとメガキャリアの利用者配分率を決定するため、以下の記号を定義する。

N : 空港の集合

Π : ODペアの集合, $(i, j) \in \Pi, i \in N, j \in N$

s : 航空会社 (1.LCC 2.メガキャリア)

F_{ij}^{LCC} : 路線 (i, j) におけるLCCの1日の運航便数

$Fare_{ij}^{LCC}$: 路線 (i, j) におけるLCCの運賃

F_{ij}^{MC} : 路線 (i, j) におけるメガキャリアの1日の運航便数

$Fare_{ij}^{MC}$: 路線 (i, j) におけるメガキャリアの運賃

V_{sij} : 路線 (i, j) における航空会社 s の効用関数
効用関数の差 $V_{1ij} - V_{2ij}$ を以下のように設定する。

$$V_{1ij} - V_{2ij} = \beta_1 + \beta_2 F_{ij}^{LCC} + \beta_3 Fare_{ij}^{LCC} + \beta_4 F_{ij}^{MC} + \beta_5 Fare_{ij}^{MC}$$

ただし、 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ は各要因のパラメータである。そして、このパラメータを実際のデータから推定する。

統計ソフトR¹[2]を利用して、最尤法によりパラメータ推定を行った。表1に、それぞれのパラメータ推定値を示す。図2は、推定したパラメータを用いて求めたLCCの利用者配分率(予測値)と実際の値(実測値)をプロットした図を示す。同時に、決定係数を示す。

パラメータ推定値について、LCCの運航便数とメガキャリアの運航便数に、より説明力があつた。また、パラメータ β_2, β_4 の符号についても妥当である。しかし、LCCの運賃とメガキャリアの運賃に対するパラメータ β_3, β_5 の符号については直観とはやや異なる結果となつた。 β_3 が正であることは、LCCの運賃が高くなれば、LCCの利用者は増え、 β_5 が負であることは、メガキャリアの運賃が高くなれば、LCCの利用者は減ることを意味している。この原因は、分析に用いた実データの中に、運賃が高くて利用者が多い路線が多く含まれているからであると考えられる。実際に、羽田-新千歳、羽田-福岡などの幹線では、運賃は高いが利用者は多い。 β_3, β_5 の統計量も問題がないので、運賃を所与として運航便数を最適化する問題を解くためにこの結果を用いる。

表1 パラメータ推定値

	定数	F_{ij}^{LCC}	$Fare_{ij}^{LCC}$
	β_1	β_2	β_3
推定値	-1.905	2.05×10^{-1}	2.03×10^{-4}
t 値	-1.968	7.005	1.527
p 値	5.36×10^{-2}	2.11×10^{-9}	1.32×10^{-1}
		F_{ij}^{MC}	$Fare_{ij}^{MC}$
		β_4	β_5
推定値		-1.2×10^{-1}	-7.1×10^{-5}
t 値		-6.040	-1.686
p 値		9.54×10^{-8}	9.69×10^{-2}

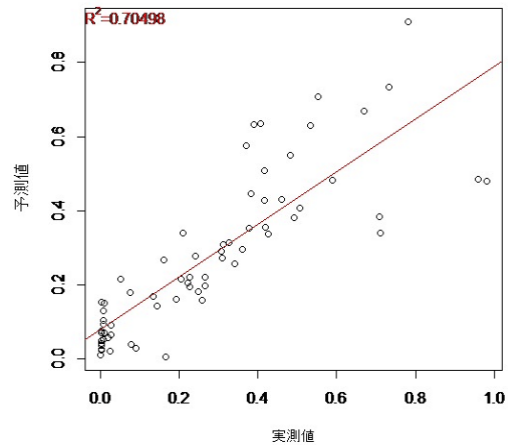


図2 LCCの利用者配分率の実測値と予測値

5 LCCのハブ空港と運航便数を決定する問題の定式化

本節では、第4節で推定し、決定したロジットモデルを使用して、LCCのハブの配置と各路線の運航便数を決定する問題を定式化する。第4.2項で定義した記号に加え、以下の記号を定義する。

D_{ij} : 路線 (i,j) における総需要数

p_{ij} : 路線 (i,j) におけるLCCの利用者配分率

q : LCCの運航便数の合計

h : 配置するハブ空港の数

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$: 第4.2項のパラメータ推定値

次に、決定変数を以下に示す。

x_{ij} : LCCの路線 (i,j) における運航便数

$$y_i = \begin{cases} 1: & \text{空港 } i \text{ をハブ空港にする} \\ 0: & \text{空港 } i \text{ をハブ空港にしない} \end{cases}$$

特に p_{ij} は決定変数 x_{ij} を用いて、以下のように定める。

$$p_{ij} = \frac{e^{\beta_1 + \beta_2 x_{ij} + \beta_3 \text{Fare}_{ij}^{LCC} + \beta_4 F_{ij}^{MC} + \beta_5 \text{Fare}_{ij}^{MC}}}{1 + e^{\beta_1 + \beta_2 x_{ij} + \beta_3 \text{Fare}_{ij}^{LCC} + \beta_4 F_{ij}^{MC} + \beta_5 \text{Fare}_{ij}^{MC}}}$$

以上のように記号を定義し、以下に定式化を示す。

$$\max \sum_{(i,j) \in \Pi} \text{Fare}_{ij}^{LCC} D_{ij} p_{ij} \quad (5)$$

subject to

$$\sum_{(i,j) \in \Pi} x_{ij} = q \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} y_i = h \quad (7)$$

$$x_{ij} \leq q(y_i + y_j), \quad (i,j) \in \Pi \quad (8)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad (i,j) \in \Pi \quad (9)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad i \in N \quad (10)$$

式(5)は、総獲得収入の最大化を目的とすることを表している。式(6)は、LCCが運航する便数は q であることを表している。式(7)は、 h 個のハブ空港を配置することを表している。式(8)は、出発地あるいは目的地がハブ空港でなければ、運航することができないことを表している。

6 計算機実験

本節では、LCCの運航便数の合計を443($q = 443$)、配置するハブ空港の数を1つの場合($h = 1$)、2つの場合($h = 2$)について、前節で提案したモデルの解を求める。LCCの運航便数の合計が443は、LCC5社の1日の総運航便数を表す。このモデルは、非線形計画問題であるので複数の初期解を生成して用いる。最適化は、市販の最適化ソフトウェアLINGO²で行った。使用した計算機のスペックは、CPUがIntel³Core³i5-2320(3.00GHz)、メモリが4GBである。

6.1 初期解の生成

ハブ空港を1つ配置する場合は、 $y_i = 1$ となる1つの空港を利用者数上位5位と下位5位(表2)の空港とし、計10通りの初期解を生成する。

A-1 羽田, A-2 新千歳, A-3 伊丹, A-4 福岡,
A-5 那覇, A-6 利尻, A-7 北大東, A-8 奥尻,
A-9 三宅島, A-10 久米島

ハブ空港を2つ配置する場合は、 $y_i = 1$ となる2つの空港を、次の2つのルール(B,C)に従って決め、計12通りの初期解を生成する。

B 利用者数上位4位(表2)の空港から2つを選択してできる以下の組み合わせ

1(羽田, 新千歳), 2(羽田, 伊丹),
3(羽田, 福岡), 4(新千歳, 伊丹),
5(新千歳, 福岡), 6(伊丹, 福岡)

C 利用者数下位4位(表2)の空港から2つを選択してできる以下の組み合わせ

1(北大東, 奥尻), 2(北大東, 三宅島),
3(北大東, 久米島), 4(奥尻, 三宅島),
5(奥尻, 久米島), 6(三宅島, 久米島)

表2 平成22年度国内空港利用者数上位5位と下位5位

1位	羽田	75位	利尻
2位	新千歳	76位	北大東
3位	伊丹	77位	奥尻
4位	福岡	78位	三宅島
5位	那覇	79位	久米島

次に、 x_{ij} の初期値に関しては、 $y_i = 1$ を満たす空港 i から現在需要が存在する路線にLCCの運航便数の合計($q = 443$)を均等に割り当てた。

例えば、 $h = 2$, $q = 443$, 決定変数 $y_i = 1$ となる空港2つが新千歳、福岡のときを考える。新千歳、福岡の現在需要のある路線がそれぞれ30路線と24路線であれば、需要のない路線は0、需要のある路線は $8.2(= \frac{443}{30+24})$ とする。

以上のように決めた決定変数 y_i , x_{ij} の値を用いて複数の初期解を生成し、それぞれについて解を求める。

6.2 実行結果

以上のように初期解を生成し、最適化を行った結果を表3、表4に示す。表の*印は運航便が出ていないハブ空港(isolated hub)を示している。この2つの結果において、目的関数値が一番高いものは、初期解A-5を用いたときである。このときのハブ空港の配置と運航便数の割り当てを図3に示す。図3では、羽田をハブ空港とし、羽田からは那覇、神戸、北九州、長崎、熊本、鹿児島、旭川、関西、函館、宮崎へ路線を運航している。この結果から、例えば、羽田から需要の多い新千歳、伊丹、福岡へは運航せず、周辺の空港へ運航していることがわかる。そのなかでも、九州地方の空港や那覇の路線に、多く運航されていることがわかる。

配置するハブ空港の数が1つの場合と2つの場合を比較すると、初期解の生成の仕方によって一概には言えないが、1つのハブ空港を配置する場合の方が、目的関数値が高い結果となった。

表3 目的関数値と計算時間とハブの配置の結果
($h = 1, q = 443$)

初期解	目的関数値	計算時間 (秒)	ハブの配置
A-1	5.70E+11	1117	羽田
A-2	5.94E+11	388	羽田
A-3	4.35E+11	120	那覇
A-4	4.96E+11	257	羽田
A-5	6.18E+11	606	羽田
A-6	5.02E+11	695	羽田
A-7	4.96E+11	490	羽田
A-8	4.88E+11	635	羽田
A-9	4.96E+11	883	羽田
A-10	4.96E+11	617	羽田

表4 目的関数値と計算時間とハブの配置の結果
($h = 2, q = 443$)

初期解	目的関数値	計算時間 (秒)	ハブ空港の配置
B-1	5.32E+11	711	羽田 福岡
B-2	5.13E+11	21	羽田 伊丹
B-3	4.83E+11	689	羽田 福岡
B-4	4.46E+11	927	伊丹 那覇
B-5	4.68E+11	306	羽田 那覇
B-6	4.55E+11	130	羽田 伊丹
C-1	2.06E+11	351	北九州 奥尻
C-2	4.96E+11	527	羽田 *三宅島
C-3	5.16E+11	403	羽田 伊丹
C-4	5.19E+11	346	福岡 種子島
C-5	4.88E+11	203	羽田 *奥尻
C-6	5.20E+11	496	羽田 那覇

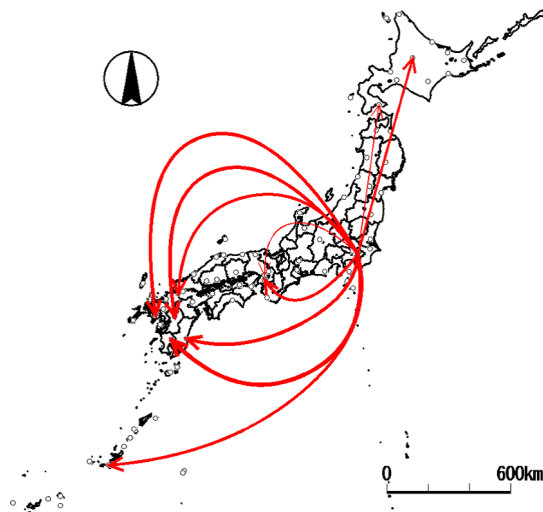


図3 1つのハブ空港の配置と運航便数443便の割り当て:
ハブ空港(羽田)

7 おわりに

本研究では、LCCの利用者配分率がロジットモデルに従って決まると仮定し、実データを用いてパラメータを推定した。次に、推定したパラメータによるロジットモデルを使い、LCCのハブ空港の配置と各路線の運航便数を決定する問題をモデル化した。さらに、複数の初期解を与え、解を求めた。

羽田空港をハブ空港とする結果が多く見られた。もともと羽田空港の利用者がもっとも多いので、ハブ空港として選ばれる回数も増えた。しかし、羽田空港からの就航都市については、必ずしも実際に需要の多い都市ばかりではないという興味深い結果が得られた。例えば、羽田-伊丹ではなく羽田-神戸や、羽田-新千歳ではなく、羽田-旭川や羽田-函館が路線として選ばれた。

本研究では、正規運賃を航空運賃と仮定して用いたが、実際には多種多様な運賃が存在する。このような状況も組み込んだモデルを考え、最適な航空運賃の決定モデルを考えることが今後の大きな課題のひとつである。また、羽田空港からの運航便を大幅に増やすことは、現実的に困難であるため、ハブ空港の航空便の着陸回数を考慮したモデルも必要であると考えられる。

最後に、パラメータ推定にあたり、多くの助言をくださった南山大学情報理工学部松田眞一教授に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 土木学会: 非集計行動モデルの理論と実際, 丸善, 1995.
- [2] 金 明哲: Rによるデータサイエンス, 森北出版株式会社, 2007.
- [3] 国土交通省, 総合政策局情報政策課交通統計室, 航空輸送統計年報, 2010.
- [4] V. Marianov, D. Serra and C. Revelle: Location of hubs in a competitive environment, *European Journal of Operations Research* **114**, 363-371, 1999.
- [5] 日本空輸株式会社プレスリリース:
<http://www.ana.co.jp/>.
- [6] M. O'Kelly: A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities, *European Journal of Operations Research* **32**, 393-404, 1987.
- [7] M. Sasaki and M. Fukushima: Stackelberg hub location problem, *Journal of the Operations Research Society of Japan* **44**, 390-402, 2001.
- [8] 佐々木美裕: ハブ空港の配置モデル, *オペレーションズ・リサーチ* **45**, 437-443, 2001.
- [9] スカイマーク株式会社プレスリリース:
<http://www.skymark.co.jp/>.

¹R は, The R Foundation for Statistical Computing の登録商標である。

²LINGO は, LINDO Systems Inc. の商標登録である。

³Intel, Core は, Intel Corporation および子会社の米国およびその他の国における登録商標である。