

路線の開設と廃止を考慮した航空ネットワーク設計モデル†

大庭 大樹 (南山大学 情報理工学部 情報システム数理学科)

佐々木 美裕 (南山大学 理工学部 システム数理学科)

E-mail: mihiro@nanzan-u.ac.jp

概要

本研究では、路線の開設と廃止を考慮したポイント・トゥ・ポイント型航空ネットワーク設計モデルを提案する。従来のハブ・アンド・スポーク型ネットワークにおいては、拠点となるハブ空港を設置し、ハブ空港を発着点とする路線を展開することが前提である。ハブ・アンド・スポークネットワークを採用することによって、広範囲に点在する需要を効率よく獲得できる一方で、乗客にとっては乗り換え回数が増えるというデメリットもある。これを解消するために、近年では、ハブ空港を設置せずにポイント・トゥ・ポイント型のサービスを展開する航空会社も存在する。本研究で提案するモデルは、従来のハブ・アンド・スポーク型のネットワークとは異なり、ハブ空港の設置は前提とせず、利用者の増加が見込まれる路線の開設と採算の取れなくなった路線の廃止を繰り返すことによって航空ネットワークを構築する。さらに、乗り換えによって生じる迂回距離を考慮した乗り換えコストを導入する。計算実験の結果、提案するモデルから得られる最適ネットワークにおいて、ハブ空港の役割を果たす空港が現れる例が見られることを示す。また、乗り換えコストが最適なネットワークに大きな影響を与えることも示す。

1 はじめに

一般に、航空需要は広範囲に点在しており、この需要を効率よくカバーすることが航空会社にとって重要な課題である。すべての空港間に直行便を設けることによって、全需要をカバーすることは可能であるが、この場合、運航する路線数が非常に多くなり、きわめて効率が悪い。そこで、1978年の米国航空規制緩和以降、効率よく需要をカバーするために各航空会社が注目したのがハブ・アンド・スポークネットワークの構築である [6]。

ハブ・アンド・スポークネットワークにおいては、ハブ空港に乗客、貨物等を集約させるため、広範囲に点在する乗客を効率よく運べることが期待されている。乗客にとっては、乗り換え回数が増えることになるが、路線数が減少することによって、一般には各路線の便数増加が可能となり、利用の選択の幅が広がるという利点がある。一方で、乗客の視点で見ると必然的に乗り換え回数が増加することになり、利便性の低下を招くことにもなる。これを回避するために、サウスウエスト航空のようにハブ空港を設置せずに路線展開を行う航空会社も現れている。

ハブ・アンド・スポークネットワークを前提としたハブ空港配置問題の研究は、O’Kelly [4] が平面上に1つまたは2つのハブ空港を配置するモデルを定式化したことに始まる。翌1987年には、同じくO’Kelly [5] 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2次整数計画問題として定式化し、2つの近似解法を提案した。O’Kellyのこれらの2つの論文を皮切りに、ハブ空港配置問題の研究は発展した [1, 2, 3]。

本研究では、これまでに提案されたハブ空港配置モデルに共通する問題点を概観し、ハブ空港を配置せずに路線を逐次的に開設することを前提としたポイント・トゥ・ポイント型の航空ネットワーク設計モデルを考える。

本論文の構成は以下のとおりである。第2節では、これまでのハブ空港配置モデル研究について概観し、多くのモデルに共通する問題点等について言及する。第3節では、提案する路線の開設・廃止モデルについて説明する。第4節では、ベンチマークデータであるCABデータを用いた計算結果について紹介する。最後に、第5において、本研究で得られた結果をまとめる。

† 本研究は、2015年度南山大学パッヘ研究奨励金 I-A-2 の助成を受けた。

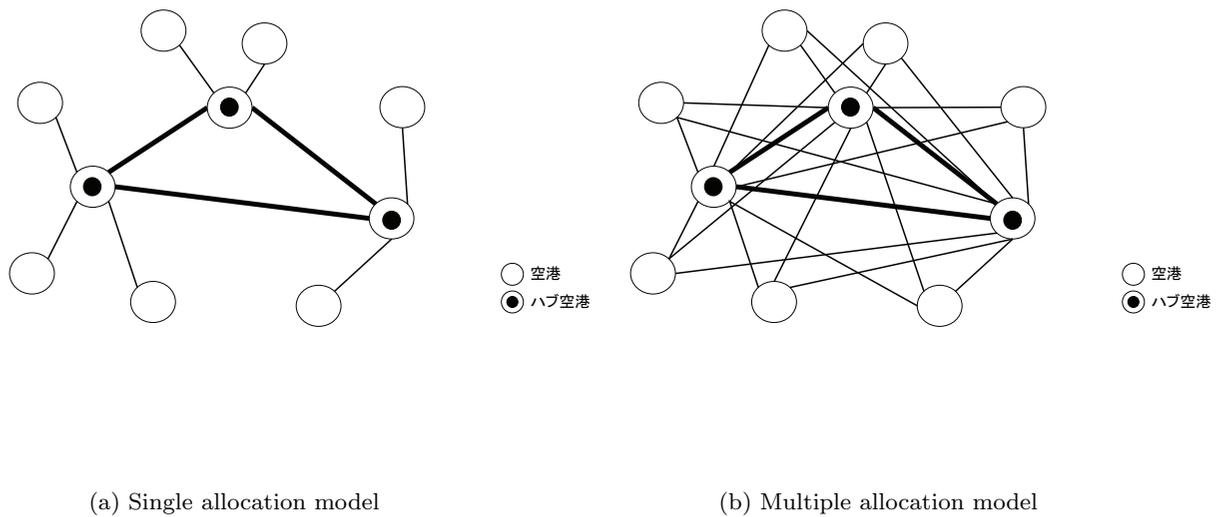


図1 Single allocation model と multiple allocation model

2 ハブ配置問題のモデル化とその課題

2.1 Single allocation model と multiple allocation model

これまでに提案されたハブ空港配置問題のモデルの多くは、ハブ空港の配置が決定するとネットワークトポロジーが一意に決まることを仮定している。その代表的なものは、ハブでない空港が1つのハブ空港のみに接続するののか、複数のハブ空港に接続するののかによってトポロジーを決定する方法で、それぞれを single allocation ルール, multiple allocation ルールと呼ぶ。いずれのルールに従うのかによって、モデルはそれぞれ, single allocation model [5], multiple allocation model [2] と呼ぶ。2つのモデルにおけるネットワークの例を図1に示す。いずれのモデルも、ハブ空港間はずべて直接接続するものとしているものが多い。すなわち、ハブ空港間にはすべて直行便が運航されることを仮定している。したがって、異なるハブに接続している空港間の移動の際には必ず2つのハブ空港を経由し、同じハブに接続している空港間の移動の際には1つのハブ空港を経由して移動する。図1からも明らかなように、各 OD ペア間の経路は, single allocation model では唯一となるのに対し, multiple allocation model では複数の選択肢が存在する。

2.2 大量輸送による輸送単価削減のパラドックス

ハブ・アンド・スポーク型を採用するメリットのひとつに、ハブ空港間の大量輸送による単位あたりの輸送費用の削減が挙げられる。O'Kelly [5] は、0以上1以下の値を取るパラメータ α を導入し、ハブ空港間の単位輸送量あたりの輸送費用を、その他の空港間の単位輸送量あたりの輸送費用の α 倍と仮定することによって、大量輸送による輸送単価の削減をモデルに取り入れた。以来、慣例として α をスケールメリットパラメータ (merit of scale または economy of scale) と呼び、同様の方法を用いた総輸送費用の最小化を目的としたハブ配置モデルが多く提案された。

α の値に関係なく、出発地または目的地がハブ空港である OD ペア間の費用最小経路は、直行便となる。出発地と目的地の双方がハブ空港ではない OD ペア間の最適経路については、以下に述べる特徴がある。 α の値が小さい場合、大量輸送による輸送単価の削減率が高いため、大半の OD ペアにおける費用最小経路はハブ空港を2回経由する経路となる。一方、 α の値が大きい場合、大量輸送による輸送単価の削減率が低いため、ハブ空港を2回経由して目的地に向かうよりも1回経由の経路の方が輸送費用が安くなることが多く、ハブ空港間を移動する乗客数の減少につながる。つまり、ハブ空港間は大量輸送が可能となるために輸送単価が安くなるという仮定のもとにス

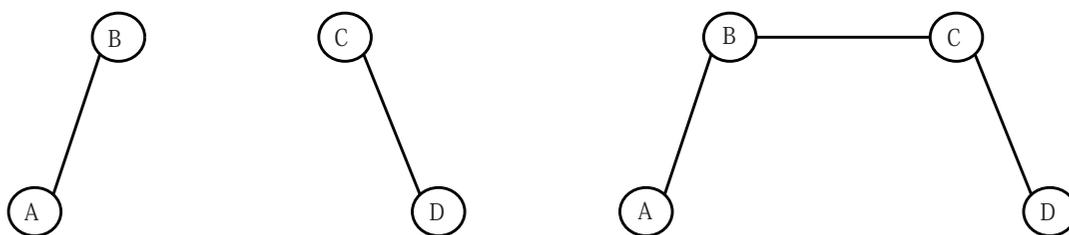
ケールメリットパラメータを導入してモデル化しているにも関わらず、得られた最適ネットワーク上におけるハブ空港間の乗客のフローは少ないという矛盾が生じている。この問題を解決するためには、費用構造の検討が必要である。

2.3 競合他者不在のネットワーク構築による弊害

前述したとおり、ハブ配置モデルの多くは、総輸送費用の最小化を目的としている。ここで疑問となるのは、航空会社にとって費用最小となる望ましいネットワークが、乗客にとっても望ましいものであるのかどうかである。輸送費用が輸送距離に比例すると仮定すれば(実際に多くのモデルではこの仮定を用いている)、輸送費用の総和が最小となるネットワークは乗客の移動距離の総和が最小となるネットワークと等しくなり、航空会社と乗客の利害は一致すると解釈することも可能である。すなわち、総輸送費用の最小化を目的とすれば、航空会社と乗客の双方にとって望ましい結果が得られるということである。しかしながら、大量輸送によるスケールメリットを考慮した場合、乗客にとって乗り換えを必要とする経路が望ましいかどうかについて疑問が残る。乗り換え回数の多い経路や極端な遠回りが必要な経路しか提供されない場合でも、乗客は他の航空会社や他の移動手段を選択することなく、必ず利用すると仮定していることはやや不自然である。また、航空会社が全需要をカバーするために、実際には採算の合わない路線も運航しなければいけない状況を引き起こすと考えられる。これらの問題を解決するためには、他者との競合を考慮することが考えられる。あるいは、不便なサービスであれば利用しない(乗客が減る)という仮定を設け、対象地域内の全需要をカバーするという制約を緩和することが挙げられる。これにより、乗客にとって利便性が高く、航空会社にとっても利益の上がるネットワーク構築が実現できると考えられる。

3 路線の開設・廃止モデルの説明

3.1 モデルの概要



(a) 2 路線を開設した場合の例

(b) 3 路線を開設した場合の例

図2 ネットワークの例

提案するモデルでは、ハブ空港の配置を前提とせず、路線を1つずつ順に開設し、開設後一定の期間が経過したのちに採算が取れないと判断された路線を廃止することによってネットワークを構築する方法を採用する。OD需要は既知とし、乗客は2回以内の乗り換えで目的地まで移動できる場合にサービスを利用すると仮定する。

ネットワークの例を図2に示す。4つの空港A, B, C, Dに対して、図2(a)は[A, B], [C, D]の2路線を開設した場合の例、図2(b)はさらに[B, C]を追加し、合計3路線を開設した場合の例である。図2(a)の場合、目的地へ移動可能なODペアは(A, B), (C, D)のみであるが、さらに[B, C]を開設した図2(b)の場合、直行便で移動可能

な (A,B), (B,C), (C,D) に加え, 1 回乗り換えで移動可能な (A,C), (B,D), および, 2 回乗り換えで (A,D) が移動可能となる.

3.2 乗り換え回数と迂回距離を考慮した乗客数の計算

一般に, 乗客は, 乗り換え回数が少なく乗り換えによる迂回距離が短い経路を好むと考えられる. そこで, 提案するモデルでは, 乗り換え回数と迂回距離を経路の利便性を計る尺度として用い, 利便性の低い経路においては利用者は減少すると仮定する.

乗り換え回数と迂回距離の双方を同時に考慮するために, 乗り換えをせずにそのまま飛行機に乗り続けた場合に移動できる距離を用いて, 乗り換えに関するペナルティを距離に換算する. これを乗り換えコストと呼び, s で表す. 飛行機の平均速度を時速 500 マイルと仮定すると, 例えば, $s = 500$ は 1 回の乗り換えにかかる時間を 1 時間として想定していることに相当する. $s = 0$ は乗り換えにかかる時間を考慮しないことに相当する. 各経路に対して, 乗り換えを考慮した移動距離 = 移動距離 + s と定義し, 迂回率を

$$\text{迂回率} = \frac{\text{乗り換えを考慮した移動距離}}{\text{直線距離}} - 1 \quad (1)$$

で定義する. さらに, 迂回率を x とし, 利用率 $r(x)$ を

$$r(x) = -\frac{1}{a}x^2 + 1 \quad (2)$$

で定義する. ここで, a は正の値をとるパラメータである. 各 OD ペアにおいて, 利用可能なすべての経路のうち迂回率が最小となる経路のみが利用されるとし, その OD 需要に利用率を乗じた値をその OD ペアの利用者数とする.

$a = 1, 4$ のときのグラフを図 3 に示す. a の値によらず $r(0) = 1$ であり, 迂回率が 0, すなわち直行便が開設されたときは需要の 100% が利用することを示す. また, $a = 1$ の時 $r(1) = 0$ であり, $a = 4$ の時 $r(2) = 0$ である. これは, 乗り換えを考慮した移動距離が直線距離 (直行便を利用したときの移動距離) のそれぞれ 2 倍, 3 倍になると利用者が 0 となることを表している. この図からもわかるように, a の値が小さいほど利用者は遠回りや乗り換えに対して敏感であることを示し, 迂回率が少し大きくなると急激に利用率が減少する.

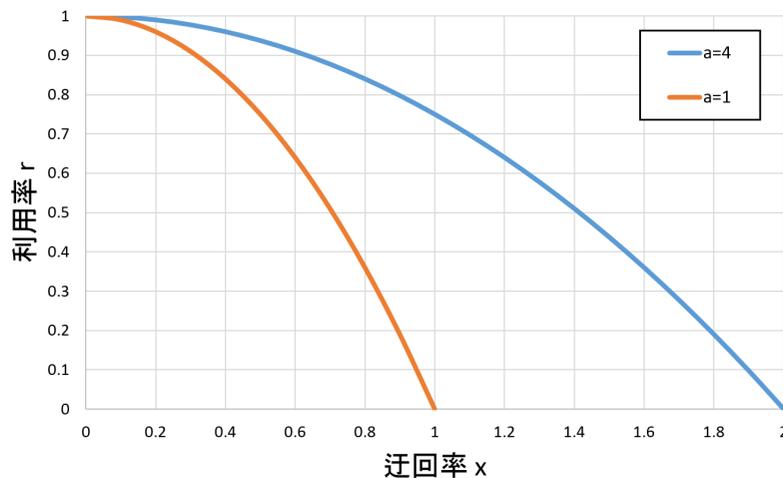


図 3 迂回率 x と利用率 r の関係: $r = \frac{1}{a}x^2 + 1$

3.3 路線開設と廃止の規則

本節では、路線の開設と廃止を順次行う具体的な手順について説明する。実際に航空会社が新規路線を開設する際、十分な利益が得られる路線に参入することは自然である。本モデルでは、利用者が多ければ利益増加につながると考え、新規開設によって利用者数が最大となるような路線を順次開設することとする。

新規路線を開設すると他の路線の利用者にも影響が出る。つまり、新規路線を開設することでネットワークの各路線の利用者が変動する。前述したとおり、ひとつの OD ペアに複数の利用可能な経路が存在する場合、もっとも迂回率の低い経路のみを利用すると仮定しているからである。開設された路線の利用者数は、周辺の路線開設によって増加する場合もあるが、逆に新規路線に利用者を奪われて減少する結果となることもある。そこで、開設当初と比較して一定以上利用者が減少した場合は、採算の取れなくなった路線であると判断し、その路線は廃止する。

4 計算実験

本節では、第 3.3 節で説明した規則に従って路線の開設と廃止を順次行った計算結果について報告する。実験に使用した計算機の CPU は Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU、メモリは 4GB である。

4.1 CAB データ

計算実験には、ベンチマークとしてよく用いられている CAB データ (アメリカ 25 空港間の 1970 年当時の 300OD 需要データ) を用いる。CAB データの 25 空港の配置を図 4 に、各空港に対応する番号と空港名を表 1 に示す。



図 4 CAB25 空港の配置図

4.2 利用者特性の違いによる影響

はじめに、 a の値の違いによる結果の変化について紹介する。 a の値が大きいほど利用者は迂回率に対して寛容になるため、迂回距離が長い経路や乗り換え回数の多い経路でも利用率の減少は小さい。一方、 a の値が小さくなると利用者は迂回率に対して敏感で厳格になり、迂回率の小さい経路が利用可能でなければ利用率は著しく減少する。ここでは、路線の開設のみを考慮し、廃止は行わない場合を例に挙げる。

図 5 は、路線の本数 = 50、乗り換えコスト $s = 300$ としたときの結果を示している。また、図 6 は乗り換え回

表 1 25 空港のリスト

空港番号	都市名	空港名	空港番号	都市名	空港名
1	アトランタ	ハーツフィールド・ジャクソン・アトランタ国際空港	14	マイアミ	マイアミ国際空港
2	ボルチモア	ボルチモア・ワシントン国際空港	15	ミネアポリス	ミネアポリス・セントポール国際空港
3	ボストン	ジェネラル・エドワード・ローレンス・ローガン国際空港	16	ニューオーリンズ	ルイ・アームストロング・ニューオーリンズ国際空港
4	シカゴ	シカゴ・オヘア国際空港	17	ニューヨーク	ジョン・F・ケネディ国際空港
5	シンシナティ	シンシナティ・ノーザン・ケンタッキー国際空港	18	フィラデルフィア	フィラデルフィア国際空港
6	クリーブランド	クリーブランド・ホプキンス国際空港	19	フェニックス	フェニックス・スカイハーバー国際空港
7	ダラス	ダラス・フォートワース国際空港	20	ピッツバーグ国際空港	ピッツバーグ国際空港
8	デンバー	インディラ・ガンディー国際空港	21	ランバート	ランバート・セントルイス国際空港
9	デトロイト	デトロイト・メトロポリタン国際空港	22	サンフランシスコ	サンフランシスコ国際空港
10	ヒューストン	インターコンチネンタル・ヒューストン国際空港	23	シアトル	シアトル・タコマ国際空港
11	カンザスシティ	カンザスシティ国際空港	24	タンパ	タンパ国際空港
12	ロサンゼルス	ロサンゼルス国際空港	25	ワシントン	ワシントン・ダレス国際空港
13	メンフィス	マンチェスター空港			

数ごとの移動可能な OD ペア数をまとめたものである。赤が直行で移動可能、黄色が 1 回乗り換えで移動可能、緑が 2 回乗り換えで移動可能を示す。

シカゴ-シアトルおよびシカゴ-サンフランシスコ路線が、図 5(a) では開設されているが、図 5(b) では開設されていないことは興味深い。いずれも需要の多い OD ペアであり、移動可能となる路線を設定することによって利用者数は増加する。 $a = 1$ の場合は、迂回率が高いと利用者数が大幅に減少するため、これらの OD ペアに直行便が開設される結果となった。しかし、 $a = 4$ の場合、迂回率が高くて利用者数の減少は小さく、シアトル-シカゴに直行便を開設しなくても、サンフランシスコとロサンゼルスを経由する経路で十分に利用者が獲得できるために直行便を開設しない結果となったと考えられる。また、図 6 からは、 a の値が変化しても 1 回乗り換えで移動可能となる OD ペア数にあまり変化はないが、 $a = 1$ から $a = 4$ にかけて 2 回乗り換えで移動可能となる OD ペア数が増えることがわかる。

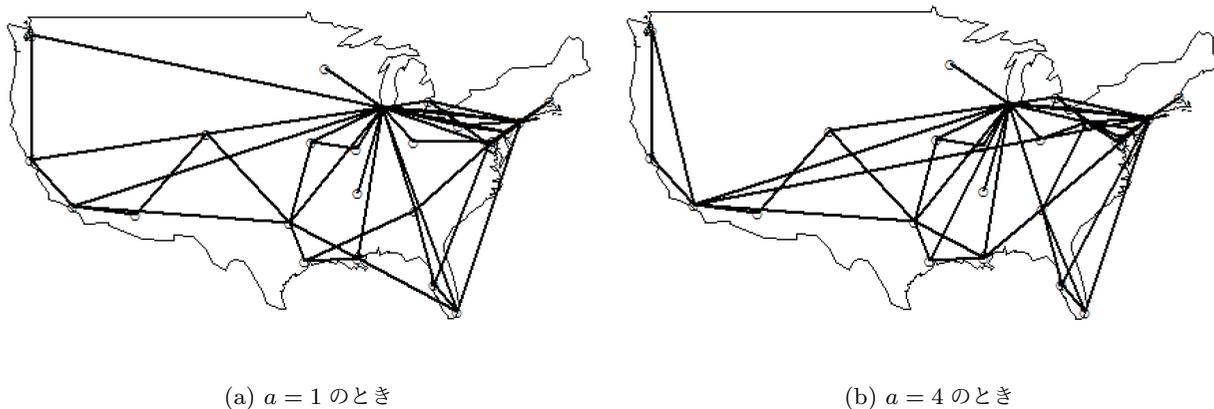


図 5 利用者特性の違いによる影響 (路線の開設のみ, 路線数=50, $s=300$)

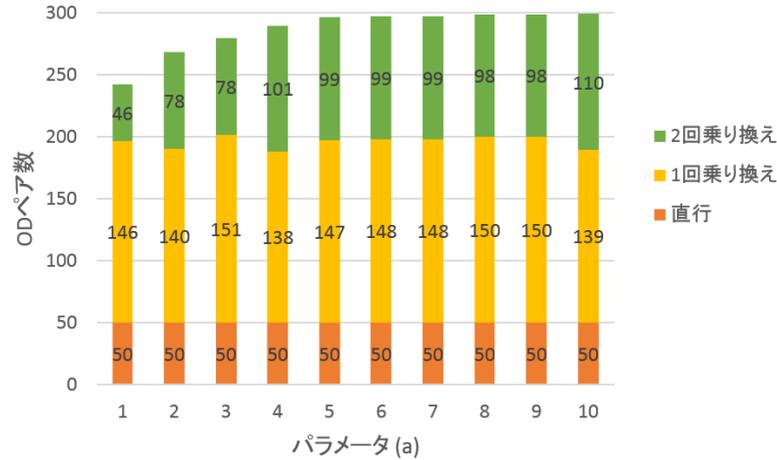


図6 aの違いによる移動可能なODペア数の変化

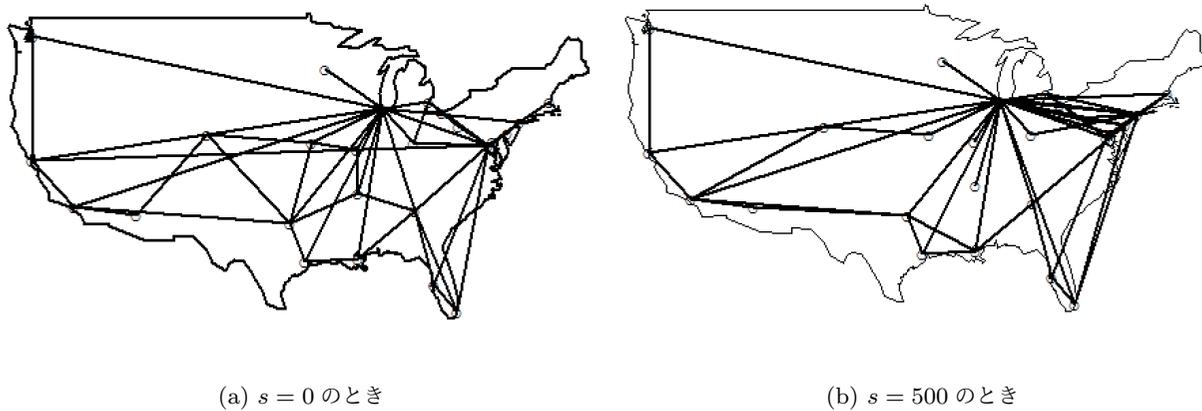


図7 乗り換えコストの違いによる影響 (路線の開設のみ, 路線数=50, $a = 1$)

4.3 乗り換えコストの違いによる影響

次に、乗り換えコストの違いがネットワークに与える影響について紹介する。図7は、路線の本数=50, $a = 1$ としたときの結果を示している。

図7(a)と図7(b)から、乗り換えコスト $s = 500$ のときシカゴに多くの路線が集中し、シカゴがハブ空港のような役割を担っていることがわかる。一方、 $s = 0$ のとき、各空港への路線の集中度に大きな違いは見られない。また、図8から乗り換えコストが増加した場合、1回乗り換えで移動可能となるODペア数と2回乗り換えで移動可能となるODペア数は減少している。特に2回乗り換えで移動可能となるODペア数は、 $s \geq 600$ のとき、ほぼ見られない。この3つの図から、乗り換えコストが増加すると、1か所に集中して路線を開設する傾向が確認できる。

4.4 路線の廃止を考慮することによる影響

最後に、路線の廃止を考慮したことによる影響について説明する。廃止の条件は、各路線の利用者数がピーク時(利用者数をもっとも多いとき)に比べて半数以下となることとする。

路線数 $p = 50$, $a = 1$ とし、乗り換えコスト s を0から500まで変化させて計算実験を行った。表2は利用者

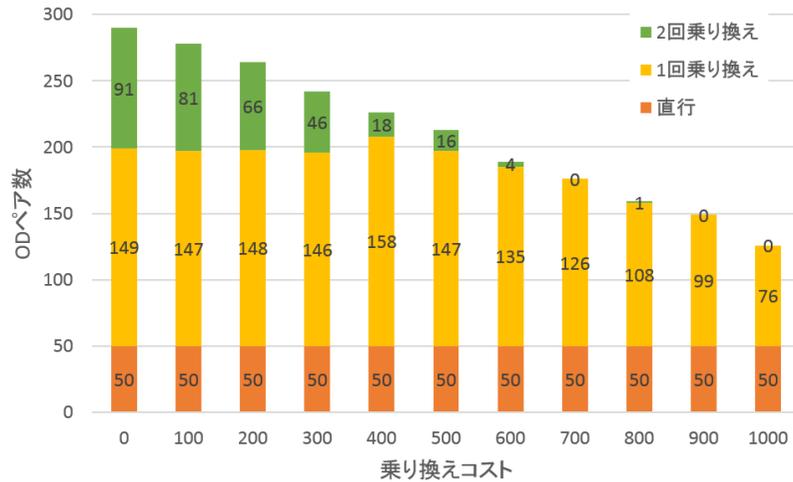


図8 乗り換えコストの違いによる移動可能な OD ペア数の変化

割合の変化をまとめたものである。ここで、利用者割合とは、50 路線を開設した際の総利用者数の総需要に対する割合である。路線の廃止が行われたのは、 $s = 0, 200, 500$ のときのみで、廃止された路線数も少ない。廃止が行われた場合はいずれも、廃止を行わない場合と比較して利用者割合が高くなっている。ただし、4 路線を廃止する結果となった $s = 0$ のときは、1 回乗り換えで移動可能となる OD ペア数が減少し、2 回乗り換えで移動可能である OD ペア数が増えるという結果が得られた。つまり、乗客にとっては利便性の下がる OD ペアが増えたが、全体の利用者数は増加したということである。

表2 利用者割合

乗り換えコスト s	0	100	200	300	400	500
開設のみ	96.59	92.01	87.51	82.84	79.12	75.76
廃止を含む	97.10	92.01	87.73	82.84	79.12	76.06
廃止した路線数	4	0	1	0	0	1

5 おわりに

本論文では、これまでのハブ配置問題のモデル化に関連する問題点等を概観し、新たな航空ネットワーク設計モデルとして、ハブ空港の設置を前提としないポイント・トゥ・ポイント型の航空ネットワーク設計モデルを提案した。ハブ空港を配置する代わりに、路線を1つずつ開設・廃止する方法でネットワークを構築する方法を採用したが、路線の廃止を考慮することによる最適なネットワークへの影響はあまり大きくない結果となった。一方で、従来のモデルではほとんど考慮されていない経路の迂回率に対する乗客の特性や乗り換えコストの違いによって最適なネットワークが変化することが確認できた。今後の課題として、提案するモデルから得られる最適ネットワークと従来のハブ・アンド・スポークネットワークの最適ネットワークの比較が挙げられる。

参考文献

- [1] S. Alumur and B.Y. Kara: “Network hub location problems: The state of art”, *European Journal of Operational Research*, 190, pp. 1-21, 2008.
- [2] J.F. Campbell: “Integer programming formulations of discrete hub location problem”, *European Journal of Operational Research*, 72, pp. 387-405, 1994.
- [3] J.F. Campbell and M.E. O’Kelly: “Twenty-five years of hub location research”, *Transportation Science*, 46, pp. 153-169, 2012.
- [4] M.E. O’Kelly: “The location of interacting hub facilities”, *Transportation Science*, 20, pp. 92-106, 1986.
- [5] M.E. O’Kelly: “A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities”, *European Journal of Operational Research*, 32, pp. 393-404, 1987.
- [6] 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*, Vol. 45, No. 9, pp. 437-443, 2000.