

ゲートウェイ空港配置モデル[†]

佐々木 美裕^a 古田 壮宏^b 鈴木 敦夫^a

概要

本稿では、対象地域から特定の別の地域への国際旅客需要を考慮したゲートウェイ空港の最適配置モデルを提案する。また、IATA が発表した 2005 年の OD データを用いて行ったアジア地域における最適ゲートウェイを求める数値実験の結果を紹介する。

1 はじめに

近年、アジア地域では、クアラルンプール (1998 年)、香港 (1998 年)、上海 (1999 年)、ソウル仁川 (2001 年)、中国広州 (2004 年) などに次々と巨大な空港が新設され、アジアのハブ空港を目指して熾烈な戦いが続いている。日本においても、1994 年の関西国際空港開港に続き、2005 年には中部国際空港が開港した。一方、ヨーロッパ地域では、フランクフルト、パリ・シャルルドゴール、ロンドン・ヒースローがヨーロッパの三大ハブと言われてきたが、近年、各地で空港の拡張工事が進み、航空需要の増大とともに航空業界の競争が激化している。

アメリカ合衆国で 1978 年に航空規制緩和されたことを機に、ハブ・アンド・スポークシステムが注目されるようになり、航空会社は一齐に独自のハブ・アンド・スポークシステムの構築に熱を注いだ。ハブ空港の最適配置モデルに関する研究は、O'Kelly [3] が最適なハブを選択する問題を 2 次整数計画問題として定式化したことに始まった。この 20 年で、さまざまなモデルと解法が研究されたが、その多くは、国内需要のみを考慮したモデルである。

アジア地域では、アメリカ合衆国とは少々事情が異なる。国内旅客需要よりも北米や欧州への国際旅客需要が大半を占めており、また、経済の発展を目指し、自国にハブ空港を建設することを国家プロジェクトとしている国も少なくない。これらのことから、O'Kelly らのハブ空港最適配置モデルをそのままアジア地域に適用することは難しい。また、近年の航空需要の増大により、空港整備や航空ネットワークの再編が重要な課題になっている地域は多数あり、国際旅客需要を考慮したモデルの適用範囲は、アジア地域のみならず幅広いと考えられる。

本稿では、対象地域から特定の別の地域への国際旅客需要を考慮したゲートウェイ空港の最適配置モデルを提案する。また、IATA(International Air Transport Association) が発表した 2005 年の OD データを用いて行ったアジア地域における最適ゲートウェイを求める数値実験の結果を紹介する。

2 モデルの説明

n 個の需要点 (ノード) を持つある地域において、 p 個のローカルハブと q 個のゲートウェイを配置することを考える (図 1)。ローカルハブは、ゲートウェイへの中継の役割を果たす。すなわち、対象地域内の小地域におけるハブである。また、ゲートウェイとは、地域外の目的地へ接続するこの地域における空の玄関とも言うべき巨大なハブである。すべての利用者の目的

[†]本研究は、2006 年度南山大学パツヘ研究奨励金 I-A-2、科学研究費 (若手研究 (B))17710148、科学研究費 (基盤研究 A(2))16201035 の助成を受けた。

^a南山大学 数理情報学部

^b南山大学大学院 数理情報研究科

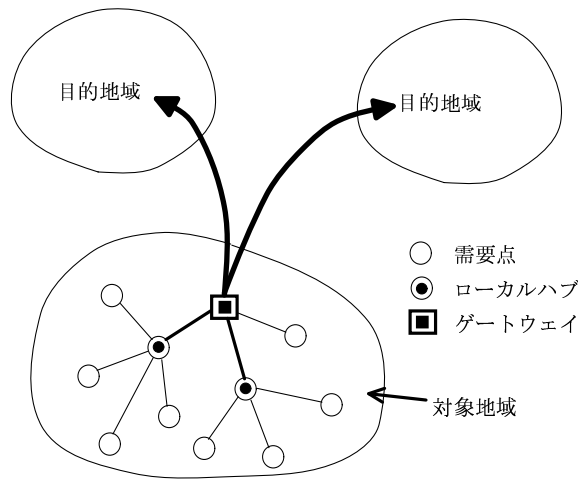


図 1: ゲートウェイ空港最適配置モデル ($p = 2, q = 1$)

地は、地域外にある同じ場所とし、ハブ以外のノードを出発地とする利用者は、ローカルハブおよびゲートウェイを経由するか、あるいはローカルハブを経由せずに直接ゲートウェイへ直行し、ゲートウェイから地域外の目的地へ移動する。このような状況は、たとえば、ノースウェスト航空の例が考えられる。ノースウェスト航空は、アジア各都市と北米各都市を結ぶ路線を成田空港をゲートウェイとして多数運航している。

この問題は、ゲートウェイとローカルハブの2つの階層を持つ階層型施設配置問題とみなすことができる。Bermanら [1] は、階層型施設配置モデルを定式化し、発見的解法を用いた計算機実験の結果について報告している。また、Narulaら [2] も同様の問題について、異なる定式化を用いている。これに対し、Sasakiら [4] は、変数も制約条件も少ないコンパクトな階層型施設配置モデルの定式化を提案した。本稿では、Sasakiらの定式化をもとに、ゲートウェイ空港配置モデルを定式化する。さらに、Sasakiら [4] が提案した厳密解法を用いて最適なゲートウェイとローカルハブの配置を求める。

3 定式化

ハブ-ゲートウェイ間およびゲートウェイ-目的地間は、大量輸送ができるため、一般に単位あたりの輸送費用が安くなる。この輸送費用の割引率をディスカウントファクタを用いて表す。なお、輸送費用は輸送距離に比例すると仮定し、輸送費用最小化の代わりに総輸送距離最小化を目的とする。ここで、次の記号を定義する。

- N : 需要点(ノード)の添え字集合
- w_i : ノード $i \in N$ における需要
- d_{ij} : 対象地域内のノード $i \in N$ とノード $j \in N$ 間の大円距離
- f_i : 対象地域内のノード $i \in N$ から目的地までの大円距離
- p : 選択するローカルハブの数
- q : 選択するゲートウェイの数
- α : ローカルハブ-ゲートウェイ間のディスカウントファクタ ($0 < \alpha < 1$).
- β : ゲートウェイ-目的地間のディスカウントファクタ, ($0 < \beta < \alpha$)
- M : 総需要 ($\sum_{i \in N} w_i$)

一般に、ゲートウェイ-目的地間の方がローカルハブ-ゲートウェイ間よりも輸送量が多くなるため、輸送費の割引率は高い(ディスカウントファクタは小さい)と仮定し、 $0 < \beta < \alpha < 1$ とした。

決定変数は、以下のとおりとする。

- x_j : ノード $j \in N$ がハブ(ゲートウェイハブまたはローカルハブ)に選択されたとき 1, そうでないとき 0 をとる変数.
- y_k : ノード $k \in N$ がゲートウェイハブに選択されたとき 1, そうでないとき 0 をとる変数.
- φ_{ij} : ノード $i \in N$ と $j \in N$ 間の流量
- ψ_{jk} : ローカルハブ $j \in N$ とゲートウェイ $k \in N$ の間の流量

ゲートウェイ空港の最適配置モデルは次のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} \varphi_{ij} + \alpha \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} d_{jk} \psi_{jk} + \beta M \sum_{k \in N} f_k y_k \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i \in N} \varphi_{ij} = \sum_{k \in N} \psi_{jk}, & j \in N, & (1) \\ & \sum_{j \in N} \varphi_{ij} = w_i, & i \in N, & (2) \\ & \varphi_{ij} \leq w_i x_j, & i, j \in N, & (3) \\ & \sum_{k \in N} \psi_{jk} \leq M x_j, & j \in N, & (4) \\ & \sum_{j \in N} \psi_{jk} \leq M y_k, & k \in N, & (5) \\ & y_j \leq x_j, & j \in N, & (6) \\ & \sum_{j \in N} x_j = p + q, & & (7) \\ & \sum_{k \in N} y_k = q, & & (8) \\ & \varphi_{ij} \geq 0, & i, j \in N, & \\ & \psi_{jk} \geq 0, & j, k \in N, & \\ & x_j \in \{0, 1\}, & j \in N, & \\ & y_k \in \{0, 1\}, & k \in N. & \end{aligned}$$

目的は、利用者の総輸送距離の最小化である。目的関数の第1項は対象地域内の各空港から接続されるローカルハブまたはゲートウェイへの輸送費用を表し、第2項はローカルハブとゲートウェイの間の輸送費を表し、第3項はゲートウェイと目的地の間の輸送費を表している。制約条件(1)は、ハブ $j \in N$ における流量保存則を表している。制約条件(2)は、ハブ以外のノード $i \in N$ における流量保存則を表している。制約条件(3)-(6)は、ハブと流量の関係に関する制約条件である。制約条件(7)はハブを $p + q$ 個選択することを表し、制約条件(8)はゲートウェイハブを q 個選択することを表している。

4 計算機実験

表 1: IATA データを用いた結果 ($p=3, q=1$)

目的地	α	β	ゲートウェイ		ローカルハブ	
北米	0.8	0.6	新潟	香港	ソウル	台北
	0.8	0.4	テグ	香港	東京 (成田)	台北
	0.8	0.2	チンジュ	香港	東京 (成田)	台北
	0.6	0.4	東京 (成田)	香港	ソウル	台北
	0.6	0.2	ソウル	香港	東京 (成田)	台北
	0.4	0.2	ソウル	香港	東京 (成田)	台北
欧州	0.8	0.6	ランチョウ	バンコク	香港	ソウル
	0.8	0.4	ターヨウ	バンコク	大阪 (伊丹)	シンガポール
	0.8	0.2	広州	バンコク	ジョホールバル	大阪 (関西)
	0.6	0.4	シエンヤン	バンコク	香港	東京 (成田)
	0.6	0.2	チャンシャ	バンコク	東京 (成田)	シンガポール
	0.4	0.2	ウーハン	バンコク	東京 (成田)	シンガポール
北米&欧州	0.8	0.6	大連	バンコク	香港	東京 (成田)
	0.8	0.4	チンタオ	バンコク	香港	東京 (成田)
	0.8	0.2	上海	バンコク	東京 (成田)	シンガポール
	0.6	0.4	ウエイハイ	バンコク	香港	東京 (成田)
	0.6	0.2	上海	バンコク	東京 (成田)	シンガポール
	0.4	0.2	チンタオ	バンコク	香港	東京 (成田)

IATA から提供されている 2005 年の OD データ (以下, IATA データ) を用いて, アジア地域のゲートウェイハブを選択する数値実験を行った. IATA データには, アジア地域の各空港と北米の各空港の間の年間総旅客数の多い 3000OD ペアのデータおよびアジア地域の各空港と欧州の各空港の間の年間総旅客数の多い 3000OD ペアのデータが含まれている. これらの OD データのうち, 次のように必要なデータを抽出して使用した.

IATA データに含まれるアジア地域の各国・地域から, 対象地域として次の 17 カ国・地域の 131 空港を需要点およびハブ候補として選択した. 国名のあとの括弧内の数は, その国内のハブ空港候補数である.

ブルネイ (1), カンボジア (2), 中国 (47), 香港 (1), インドネシア (4), 日本 (16), ラオス (1), マカオ (1), マレーシア (5), モンゴル (1), ミャンマー (1), フィリピン (19), シンガポール (1), 韓国 (7), 台湾 (2), タイ (16), ベトナム (6).

目的地域である北米からは, アメリカ合衆国, カナダ, メキシコの 3 カ国・地域から 223 空港を選択した. ただし, ハワイ諸島など離島にある空港は対象外とした. 同様に, 欧州からは, 36 カ国・地域から 141 空港を選択した. ただし, ロシアについては, 東経 40 度以西のみに位置する空港のみを対象とした.

アジア地域 131 空港と北米地域 223 空港の OD データ, および, アジア地域 131 空港と欧州地域 141 空港の OD データを使用して, 目的地域までの距離と需要を次のように設定した. 各ハブ候補空港から目的地までの距離は, 目的地域各空港までの大円距離の平均とした. たとえば, 成田から北米までの距離は, 成田から北米 223 空港までの大円距離の平均となる. 需要については, 各ハブ候補空港と目的地域各空港の間の需要の合計とした. たとえば, 成田-北米間の需要は, 成田と北米 223 空港との間の往路復路の需要総合計となる.

$p = 3, q = 1$ とし, (α, β) は, $(0.8, 0.6), (0.8, 0.4), (0.8, 0.2), (0.6, 0.4), (0.6, 0.2), (0.4, 0.2)$ の 6 つの組み合わせを用いた. また「全需要の目的地が北米」「全需要の目的地が欧州」「需要

の半数の目的地が欧州，半数の目的地が北米」の3パターンを考え，計18パターンについて計算を行った．問題はすべて，ILOG CPLEX10.0を用いて解いた．使用した計算機は，Intel Pentium 4 プロセッサ (3.0GHz) 搭載の DELL DIMENSION 8300，メモリは2GBである．

ゲートウェイ空港配置モデルは，階層型施設配置モデルとみなすことができるので，ゲートウェイの位置を既知とすると p -メディアン問題となる [4]．したがって， $q = 1$ の場合， p -メディアン問題を n 回解くことにより，厳密解を得ることができる．今回の数値実験では， $q = 1$ としたので，この解法を用いた．計算時間は，1パターンあたり約100秒から170秒である．

表1は，18パターンにおける最適なゲートウェイとローカルハブを一覧にしたものである．図2は，北米を目的地域とした場合の最適な航空ネットワークを表している．同様に，図3は欧州を目的地域とした場合，図4は北米と欧州の双方を目的地域とした場合の結果である．いずれも太線はローカルハブ-ゲートウェイ間を表す．

図2, 3から， α を固定した場合， β が大きくなるにつれてゲートウェイの位置が目的地域方面に偏ることがわかる．ゲートウェイから目的地域までの輸送費の割合が高くなると，その費用を抑えるために，目的地域方面に近い空港がゲートウェイとして選ばれる傾向にあると考えられる．一方，表1からは，ローカルハブとして選ばれた空港は比較的規模の大きい空港が多いのに対し，ゲートウェイは一部を除いて中規模程度の空港がよく選ばれることがわかる．さらに，ローカルハブとして選ばれる空港は，目的地域によって多少の変化はあるものの，安定して選ばれている．ディスカウントファクタの変化によって，特にゲートウェイの配置は大きく変化する傾向があることがわかる．ローカルハブの中には，あまり多くの空港と接続されないものも見受けられる．現実的なネットワーク構築のために，モデルの再検討が必要であろう．

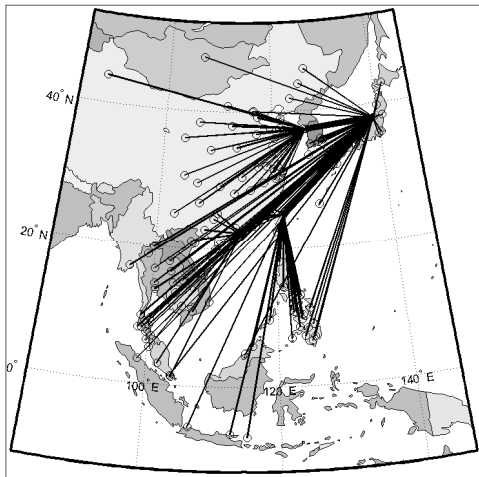
5 おわりに

ある対象地域におけるゲートウェイ空港と地域内の複数のローカルハブの最適配置を求めるモデルを提案し，IATAが提供している2005年の実際の航空需要データを用いて数値実験を行った結果を紹介した．

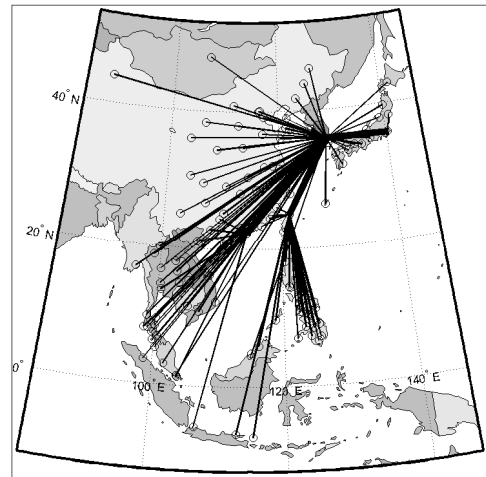
今後は，ディスカウントファクタの変化によって，ゲートウェイやローカルハブの最適配置がどのように変化するのかについて分析する予定である．また，ある地域の需要に変化があった場合の感度分析を行い，モデルの再検討をしたい．さらに，地域内の需要や国内旅客需要も考慮したゲートウェイの最適配置モデルの提案も今後の課題の1つである．

参考文献

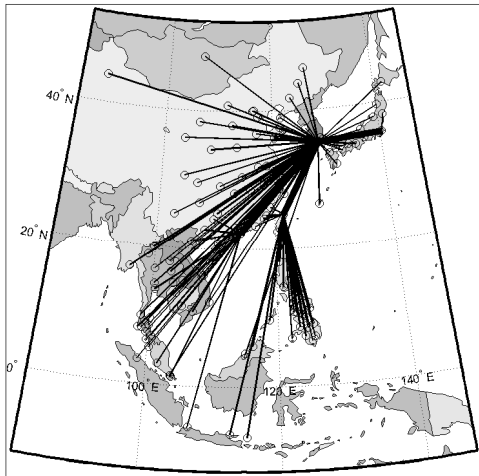
- [1] O. Berman, Z. Drezner and G.O. Wesolowsky: The facility and transfer points location problem. *International Transactions in Operational Research*, **12** (2005) 387–402.
- [2] S.C. Narula and U.I. Ogbu: An hierarchical location-allocation problem. *Omega International Journal of Management Science*, **7** (1979) 137–143.
- [3] M. E. O’Kelly: A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities, *European Journal of Operational Research*, **32** (1987) 393–404.
- [4] M. Sasaki, T. Furuta and A. Suzuki: Exact optimal solutions of the minisum facility and transfer points location problems on a network, *Technical Report of the Nanzan Academic Society Mathematical Sciences and Information Engineering (NANZAN-TR-2006-02)*, 2006.



(a) $\alpha = 0.8, \beta = 0.6$



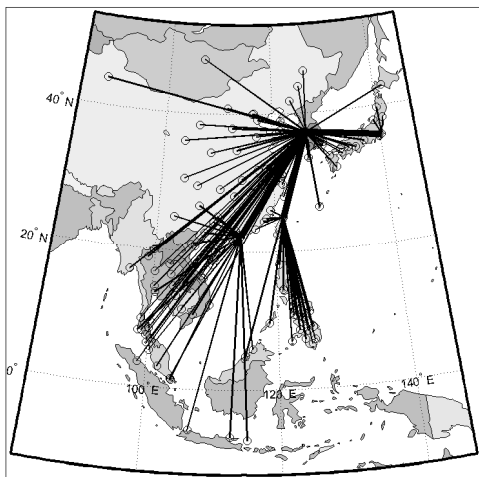
(b) $\alpha = 0.8, \beta = 0.4$



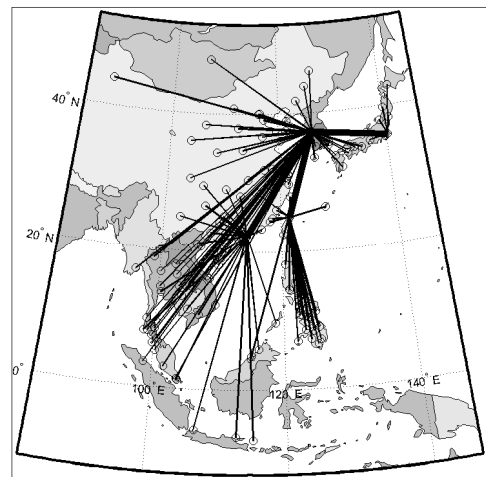
(c) $\alpha = 0.8, \beta = 0.2$



(d) $\alpha = 0.6, \beta = 0.4$

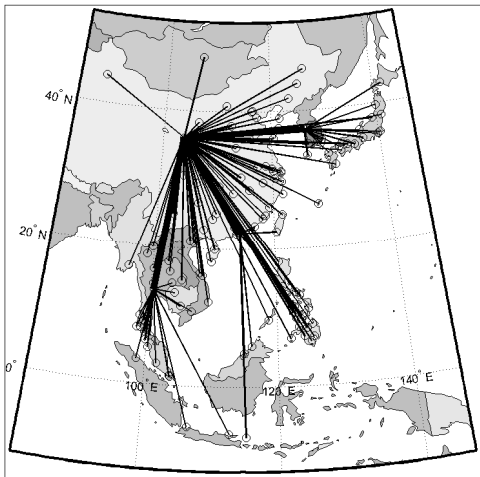


(e) $\alpha = 0.6, \beta = 0.2$

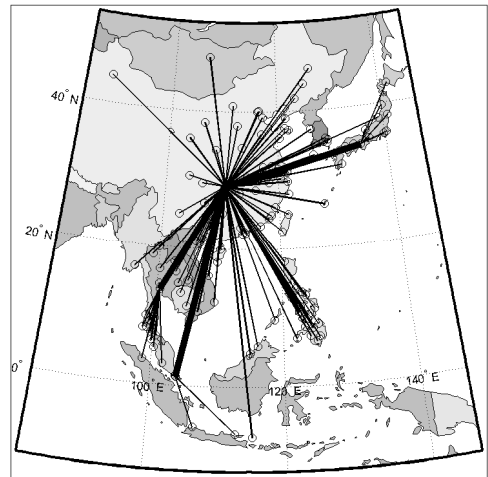


(f) $\alpha = 0.4, \beta = 0.2$

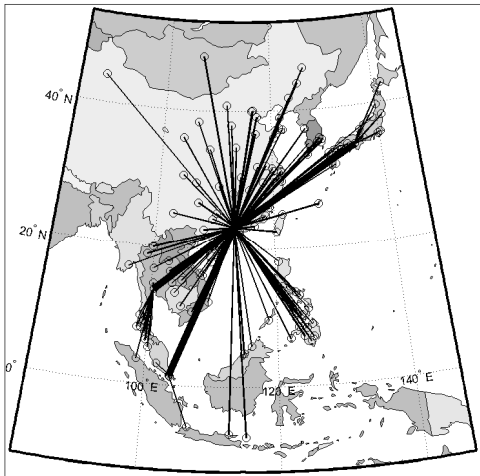
図 2: IATA データを用いた結果 ($p = 3, q = 1$, 目的地域: 北米)



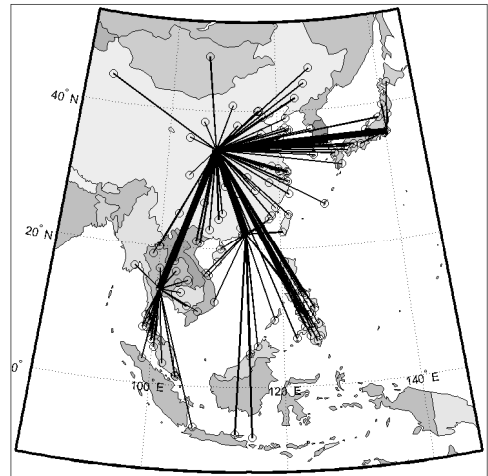
(a) $\alpha = 0.8, \beta = 0.6$



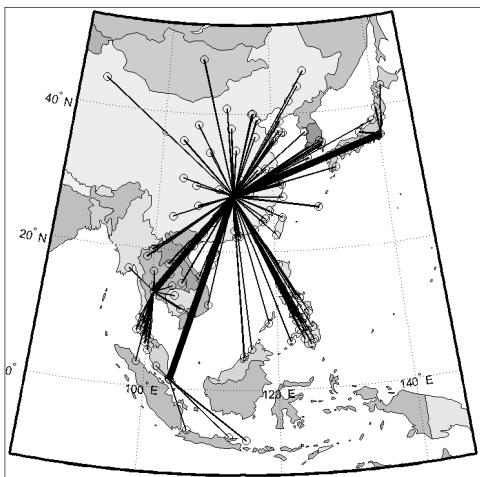
(b) $\alpha = 0.8, \beta = 0.4$



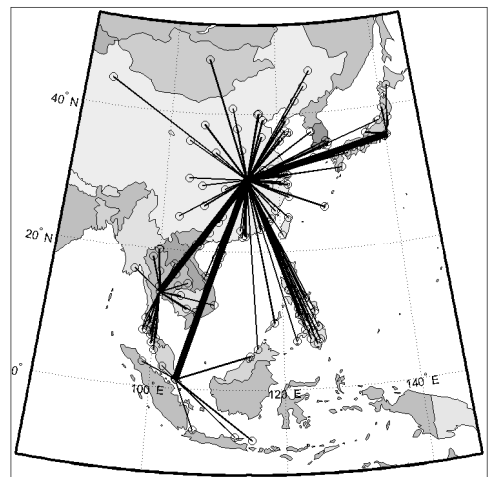
(c) $\alpha = 0.8, \beta = 0.2$



(d) $\alpha = 0.6, \beta = 0.4$

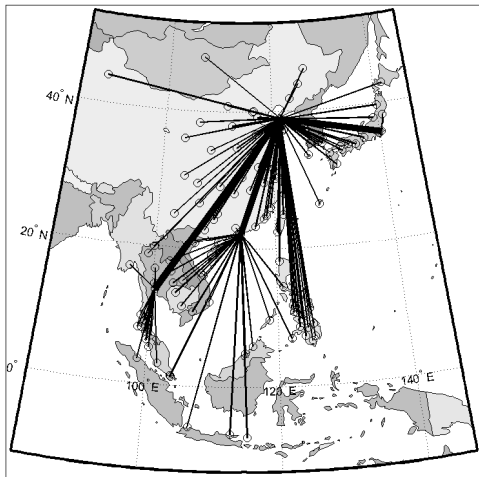


(e) $\alpha = 0.6, \beta = 0.2$

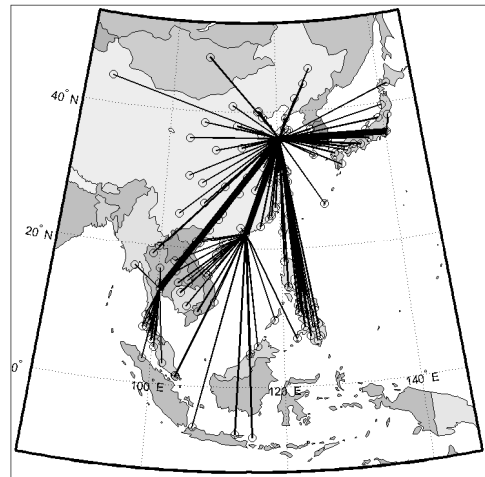


(f) $\alpha = 0.4, \beta = 0.2$

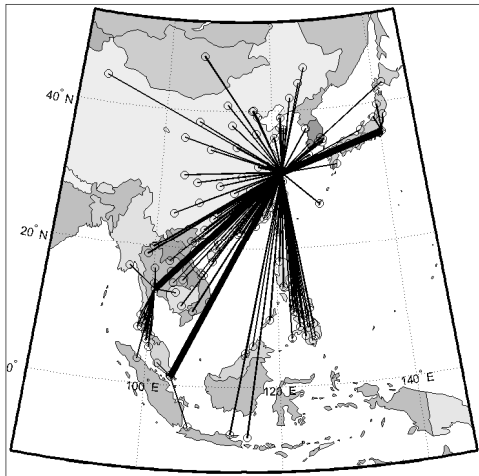
図 3: IATA データを用いた結果 ($p = 3, q = 1$, 目的地域: 欧州)



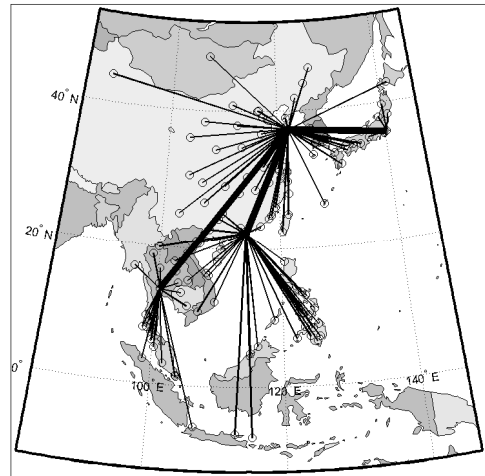
(a) $\alpha = 0.8, \beta = 0.6$



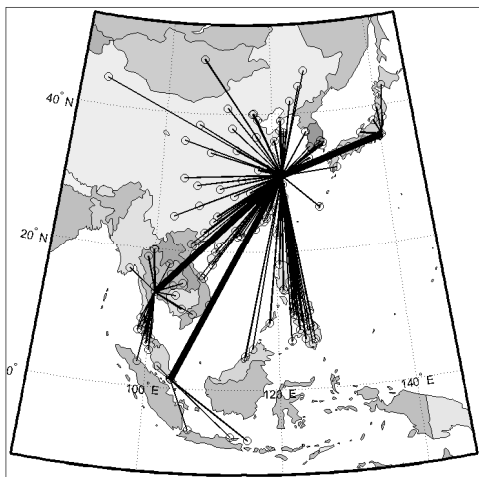
(b) $\alpha = 0.8, \beta = 0.4$



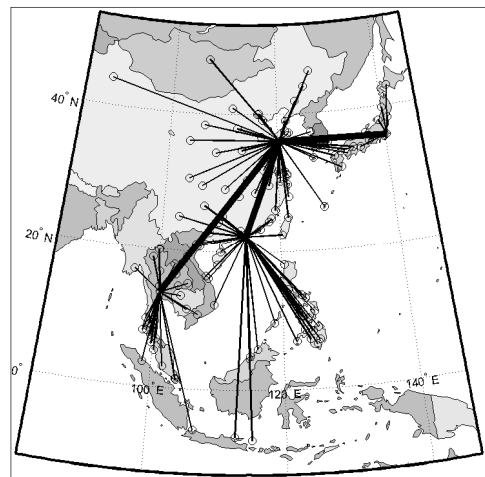
(c) $\alpha = 0.8, \beta = 0.2$



(d) $\alpha = 0.6, \beta = 0.4$



(e) $\alpha = 0.6, \beta = 0.2$



(f) $\alpha = 0.4, \beta = 0.2$

図 4: IATA データを用いた結果 ($p = 3, q = 1$, 目的地域: 北米&欧州)