

一般化ウェーバーモデルによる 航空貨物ハブ配置の分析

渡部 大輔

近年、航空貨物輸送が急速に増加しており、東アジアにおいては航空貨物ハブの配置が進められている。本論文では、輸送費用を最小とする単一ハブ配置の最適化について、輸送費用関数に輸送量と輸送距離に関する規模の経済性を考慮した一般化ウェーバーモデルを用いて考察する。その際、一次元・二次元の規則的な需要点分布とともに、東アジアにおける航空貨物の輸送費用関数と需要点分布を用いた分析結果について報告する。

キーワード：施設配置問題、ウェーバーモデル、航空貨物、地理情報システム

1. はじめに

近年、新興国を中心とした経済発展により、国際物流量は増加傾向が見られ、特に東アジアでの物流が活発化している。しかし、国際物流における我が国の港湾・空港の地位は大幅に低下している。国際海上コンテナ取扱数では、1980年には神戸港4位、横浜港12位と上位を占めていたのが、2005年には東京港22位、横浜港27位へと順位が低下している[5]。さらに、国際航空貨物取扱量では、1995年まで成田空港が1位であったのが、2008年には香港空港、仁川空港に続く3位へと順位が低下している[13]。東アジア諸国では、上海空港等で取扱量が急激に増加しているのに対して、成田空港では2004年を境に取扱量の減少傾向すら見られる。このように、1990年代から国際的に競争力を低下した港湾と同じく、空港においても2000年代後半から急速に低下している。

東アジア諸国の空港では、自国内だけでなく、近隣諸国も含めた地域外の目的地へ接続する役割を果たす玄関口となるゲートウェイ空港[10]としての機能を強化している。大手インテグレーター各社は2000年代後半から、東アジアにおける貨物ハブを、中国南部の珠江デルタ地帯（FedEx：広州空港、UPS：深セン空港、DHL：香港空港）に設置している。さらに、我が国の航空会社では、2009年10月に沖縄・那覇空港に航空貨物基地を設置し、沖縄ハブ&スポーク方

式による運用を開始した[12]。その際、日本・アジア間の輸送のみならず、アジア域内輸送も対象とすることから、アジア各国の中心に位置するという地理的優位性を第一とした選択を行っている。

そこで、「東アジアに航空貨物ハブを一カ所配置するとしたら、どこがよいのか？」という問いを考えてみたい。貨物取扱量が最も多い空港に配置すべきなのか？ それとも、貨物取扱量とともに輸送距離のバランスを考慮した最適な配置が考えられるのか？ 本論文では、施設配置問題の一種であるハブ空港配置問題[11]に基づいて考察することとする。

ハブ空港配置問題を初めて定式化したO'Kelly[7]では、ウェーバーモデルにより導出された最適点が、実際に多くの航空貨物ハブが立地する米国中西部に位置したことから、ウェーバーモデルによるハブ空港配置に対する説明力の高さが示された。なお、需要データとして、米国の主要25都市間の航空需要データであるCABデータを用いており、ハブ配置問題のベンチマークデータとしてOR-Library[2]にて公開されている。その後、ハブ・メディアン問題等の離散配置モデルが多数提案される一方、ウェーバーモデルによる分析はほとんど行われていない[6]。この原因としては、旅客輸送は複数のハブで構成される場合が多いため、あらかじめ与えられた候補からハブ空港を選択するという離散配置モデルの定式化に適合することが挙げられる。一方、今回対象とする貨物輸送は、旅客輸送と同様にハブ・アンド・スポーク型輸送システムが採用されているが、地域別に単一のハブで構成される場合が多いため、ある程度問題を単純化してとらえることが可能である。そして、目的関数が輸送距離の

わたなべ だいすけ
東京海洋大学 海洋工学部
〒135-8533 江東区越中島 2-1-6

非線形関数である一般化ウェーバーモデル[9]を用いることで、配置可能点の制約を受けることなく、現実の輸送費用を近似した最適配置を考察することが可能となる。

本論文では、輸送費用を最小とする単一ハブ配置の最適化について、輸送費用関数に輸送量と輸送距離に関する規模の経済性を考慮し、輸送距離だけでなく輸送量もべき関数として一般化したウェーバーモデルを用いて考察する。その際、輸送費用関数の違いを考慮し、一次元・二次元の規則的な需要点分布とともに、東アジアにおける航空貨物の輸送を対象とした分析を行う[8]。

2. 一般化ウェーバーモデルによる定式化

ウェーバー問題とは、輸送距離と輸送量の積和で定式化された総輸送費用が最小となる地点（ウェーバー点）を導出する問題である[3]。古典的立地論の一つである工業立地論では、立地三角形として、原材料の供給地2地点と需要地としての市場1地点が与えられている場合に、最も輸送費用の少ない工場の最適点を求めている。本モデルでは、空港の位置と需要量が与えられている場合に、最も輸送費用の少ない中継施設としてのハブの最適点を求めることとする。

ウェーバー問題において、輸送費用では輸送量・輸送距離に関する線形関数を仮定している。しかし、輸送において一般的に長距離通減、重量通減[1]の関係が見られることから、輸送量・輸送距離が増加するとともにその費用増加分が通減していく「規模の経済性」が存在する[4]。

そこで、一般化ウェーバーモデルとして、輸送量と輸送距離に関する規模の経済性を考慮した定式化を行うこととする。輸送費用 C は、需要点 i における輸送量 q_i および施設までの輸送距離 l_i のべき関数の積和で表すこととし、固定係数 K 、輸送量弾性値 α 、輸送距離弾性値 β を用いて、運賃に関する規模の経済性を表す。つまり、図1のように、輸送費用を最小とするような最適点の座標 (x, y) を求めることとなり、

$$\min_{x,y} C = K \sum_{i=1}^n q_i^\alpha l_i^\beta(x, y) \quad (1)$$

を求めることとする。ただし、施設 (x, y) と需要点 (x_i, y_i) との間はユークリッド距離で移動できるとして、

$$l_i(x, y) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2)$$

と表す。

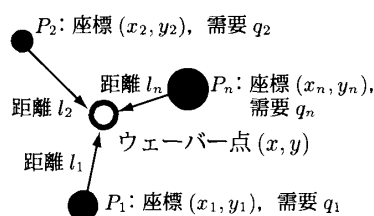


図1 ウェーバーモデル

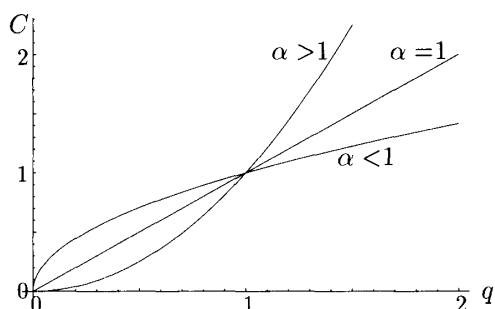


図2 輸送費用関数の形状

目的関数の式(1)の性質について確認すると、図2のように、輸送量弾性値 α が1と等しい場合は需要について線形関数、輸送量弾性値 α が1未満の場合は凹関数、1より大の場合は凸関数となる。輸送距離弾性値 β も距離について同様の関係が見られる。なお、通常ウェーバー点は $(\alpha=1, \beta=1)$ で表現でき、運輸部門の分析で通常用いられる「トンキロ指標」と同じであることが分かる。

3. 規則的な需要点分布における分析

3.1 一次元都市（二点）

最も単純な仮定として、一次元の線分都市に、二点の需要量がある場合について考察する。なお、 $\alpha=1, \beta=1$ のケースについては、鉄道工場の最適配置を論じた「矢部の問題」[15]と同様の定式化となる。

長さ L の線分の両端に二都市があり、その需要量をそれぞれ q_1, q_2 (ただし、 $q_1 > q_2$) とすると、

$$\begin{aligned} \min_x C &= K \sum_{i=1}^2 q_i^\alpha l_i^\beta(x) \\ &= K \{q_1^\alpha x^\beta + q_2^\alpha (L-x)^\beta\} \end{aligned} \quad (3)$$

となり、 x に関する一階の条件より、 $\beta > 1$ の場合の最適な配置場所は、

$$x^* = \frac{L}{1 + (q_1/q_2)^{\beta-1}} \quad (4)$$

と求められる。

数値実験として、一辺 $L (=10000)$ の直線において、

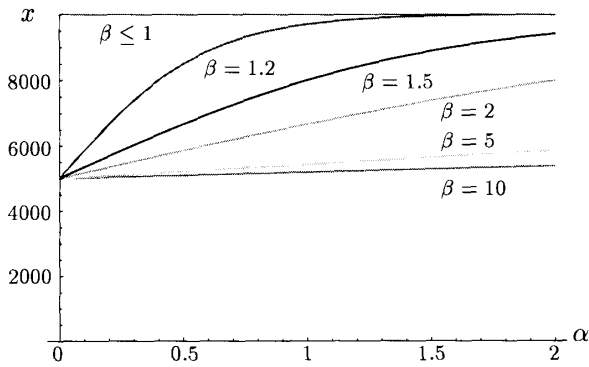


図3 一次元都市における最適点の変化

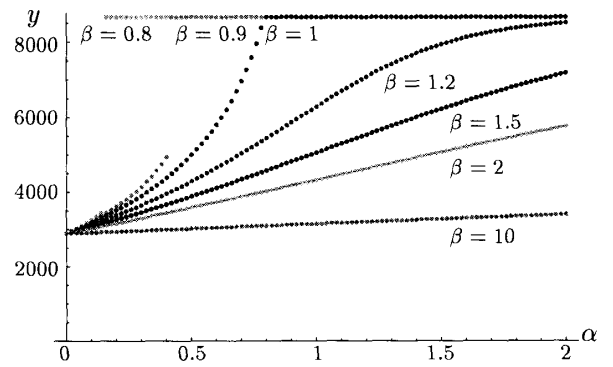


図4 二次元都市における最適点の変化

両端に需要点がある場合を扱う。各点の座標は、点A: 0, 点B: L であり、各点の需要量 q_i は、基準となる需要 $q (=10000)$ とすると、点A: $q_1=q$, 点B: $q_2=2q$ として、点Bの方が需要が大きいうように設定する。

最適点 x^* と輸送量弾性値 α , 輸送距離弾性値 β の関係をプロットすると、図3のようになる。輸送距離弾性値 β が1より大きい場合、輸送量弾性値 α が小さくなるほど、最適点は中心部の方へ移動する。しかし、輸送距離弾性値 β が1以下の場合、輸送量弾性値 α の値に寄らず、最適点は需要量の大きい点B上に位置する。

3.2 二次元都市 (三点)

立地三角形を想定して、三点の需要量がある場合について考察する。一辺 L の正三角形において、各頂点に需要点がある場合を扱う。

この場合、前節とは異なり、二乗距離 ($\beta=2$) の場合を除いて、一般的には式(1)を陽に解くことはできない。二乗距離 ($\beta=2$) の場合について、各点の座標を点A: $(0, 0)$, 点B: $(0, L)$, 点C: $(L/2, \sqrt{3}L/2)$ とし、需要を点A: q_1 , 点B: q_2 , 点C: q_3 であるとすると、式(1)は、

$$\begin{aligned} \min_{x,y} C &= K \sum_{i=1}^3 q_i^\alpha l_i(x, y)^2 \\ &= K [q_1^\alpha (x^2 + y^2) + q_2^\alpha \{(x-L)^2 + y^2\} \\ &\quad + q_3^\alpha (x-L/2)^2 + (y-\sqrt{3}L/2)^2] \end{aligned} \quad (5)$$

と展開することができ、 x と y に関する一階の条件より、最適点は、

$$x^* = \frac{2q_2^\alpha + q_3^\alpha}{q_1^\alpha + q_2^\alpha + q_3^\alpha} \frac{L}{2} \quad (6)$$

$$y^* = \frac{q_3^\alpha}{q_1^\alpha + q_2^\alpha + q_3^\alpha} \frac{\sqrt{3}L}{2} \quad (7)$$

と求められる。特に、 $q_1=q_2$ のとき $x^*=L/2$ となり、

点Cと同じ x 座標となる。

数値実験として、一辺 $L (=10000)$ の正三角形において、各頂点に需要点がある場合を扱う。各点の座標は、点A: $(0, 0)$, 点B: $(0, L)$, 点C: $(L/2, \sqrt{3}L/2)$ であり、各点の需要量 q_i は、基準となる需要 $q (=10000)$ とすると、点A: $q_1=q$, 点B: $q_2=q$, 点C: $q_3=2q$ と、点Cが他点より需要が大きいうように設定する。

需要の仮定が $q_1=q_2$ のとき、 $x^*=L/2$ となる。そこで、最適点の座標 y^* と輸送量弾性値 α , 輸送距離弾性値 β の関係をプロットすると、図4のようになる。輸送距離弾性値 β が1より大きい場合、輸送量弾性値 α が小さくなるほど、最適点は中心部の方へ移動する。輸送距離弾性値 β が1以下の場合、輸送量弾性値 α が1以下となると、最適点は中心部の方へ移動する。さらに、解析解 ($\beta=2$) については、式(7)を実線でプロットしているが、数値実験の結果と一致している。

パラメータを代入した式(1)の目的関数値を計算し、等費用曲線を描画すると、図5のようになる。輸送量弾性値 α が大きくなると最大需要点である点Cに近づき、輸送距離弾性値 β が大きくなると中心方向へ近付いていることが分かる。図5(iii)の場合、解析解 ($\beta=2$) は式(6)と式(7)より、最適点の座標は $(x^*, y^*) = (5000, 4330)$ となり、数値実験の結果が一致している。

4. 東アジアにおける航空貨物の分析

4.1 データとパラメータ

そして、図6のような東アジア域内の主要8空港(東京・成田空港, 大阪・関西空港, ソウル・仁川空港, 台北空港, 香港空港, 北京空港, 上海空港, 広州空港)を対象とし、需要量のデータは5時点(1990年, 1995年, 1999年, 2002年, 2007年)を用いて、

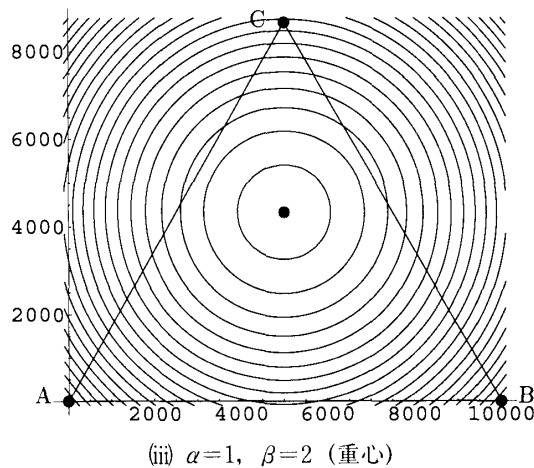
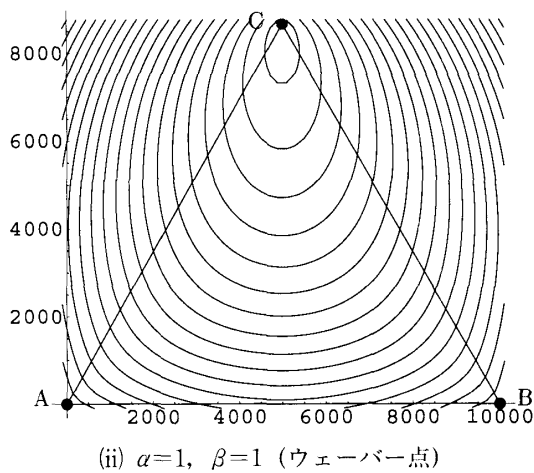
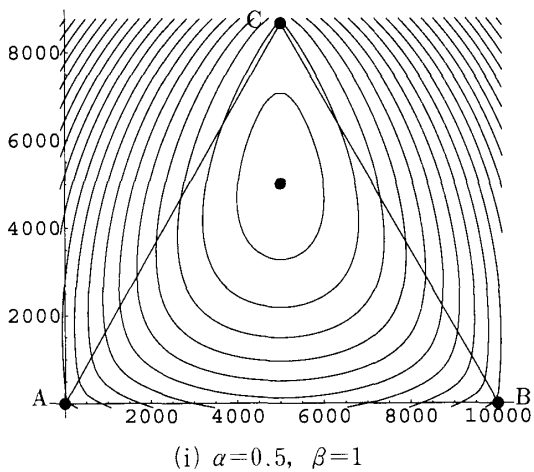


図5 二次元都市における最適点

航空貨物の輸送をモデル化する。

- 固定係数 K , 輸送量弾性値 α , 輸送距離弾性値 β : 表1
- 需要量 q_i : 国際航空貨物の空港別年間取扱量 (トン) [13]
- 距離 $l_i(x, y)$: メルカトル図法による地図上にお

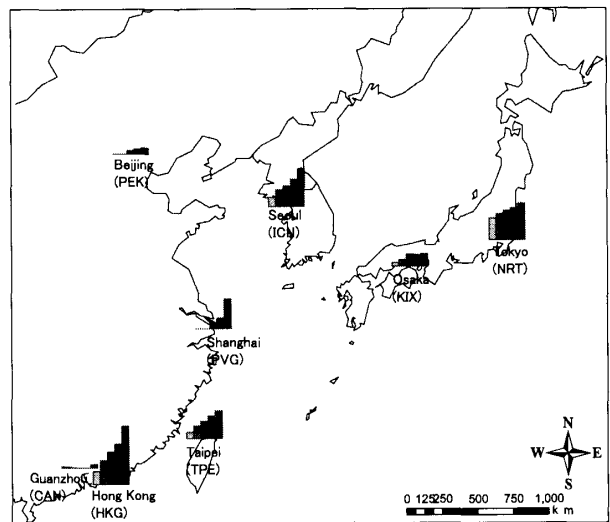


図6 対象空港と需要量

表1 パラメータの推計結果 (2007年)

国	K	α	β	R^2
日本	1.726	0.894	0.750	0.997
アメリカ	147.704	0.957	0.195	0.999

けるユークリッド距離

パラメータ K, α, β の推計に際して、国際航空貨物に関する適切な輸送費用を入手できなかったことから、国内航空運賃を用いて分析を行う。なお、航空貨物では大手インテグレータがアジアにおいてサービスを展開していることから、アメリカのパラメータについても対象とする。式(1)におけるパラメータを、2007年における国内航空貨物の距離帯・重量帯別運賃表 [14] を用いた非線形回帰分析により推定を行った結果、表1のようになった。その結果、輸送量弾性値 α と輸送距離弾性値 β とともに1以下であるので、輸送量・輸送距離ともに規模の経済性が存在することを確認した。日本は、固定係数 K の値が小さく、輸送量弾性値 α と輸送距離弾性値 β の値が1に近いことから、輸送費用における固定費が低く、輸送量・輸送距離に比例した運賃体系であるといえる。一方、アメリカは、固定係数 K の値が大きく、輸送量弾性値 α の値が1に近いが、輸送距離弾性値 β の値が小さいことから、輸送費用における固定費が高く、輸送量に比例する一方、輸送距離の割引を強化した運賃体系であるといえる。

4.2 ウェーバーモデルによる時系列分析

まずは、最も基本となるウェーバーモデル ($\alpha=1, \beta=1$) を用いて分析を行う。各年の需要量を用いてウ

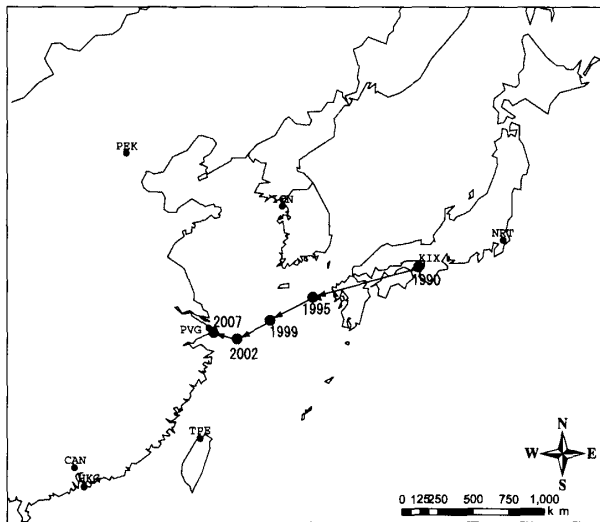
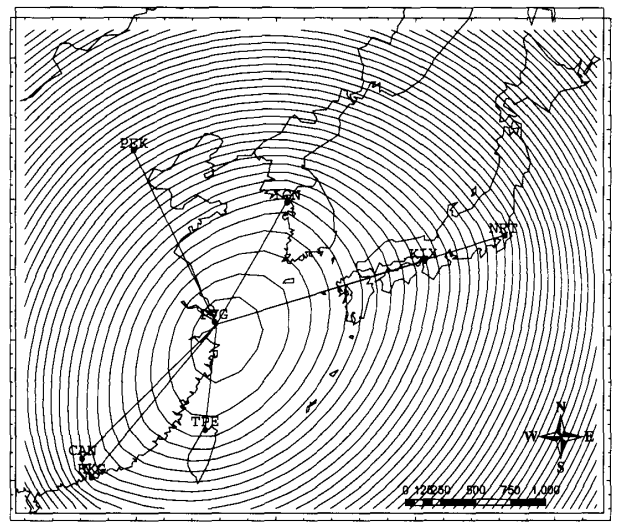


図7 ウェーバー点の推移 (1990~2007年)



(i) ウェーバー点 ($\alpha=1, \beta=1$)

ウェーバー点を算出すると、図7のようになる。

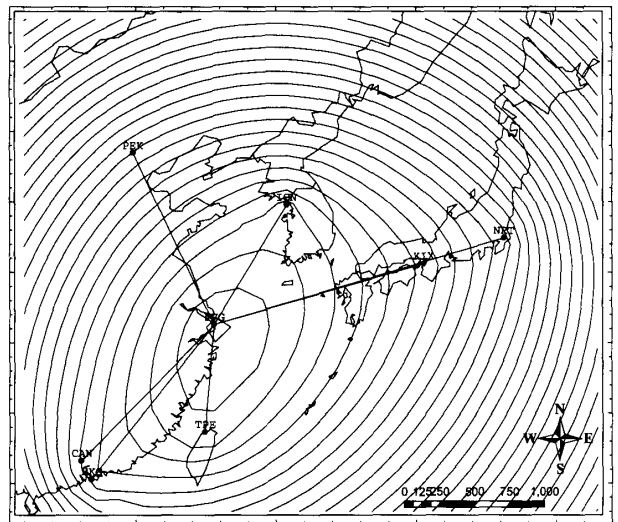
図より、ウェーバー点は、1990年には関西空港周辺にあったが、1995年には瀬戸内海を西に移動して九州・五島列島周辺へ移動し、さらに黄海の上を西に移動して、2007年には対岸の中国・上海空港周辺に位置している。このように、ウェーバー点が西へとシフトしていることから、1990年代から韓国、中国での貨物取扱量の増加について、地図上に可視化することができた。

4.3 最適点の算出と考察

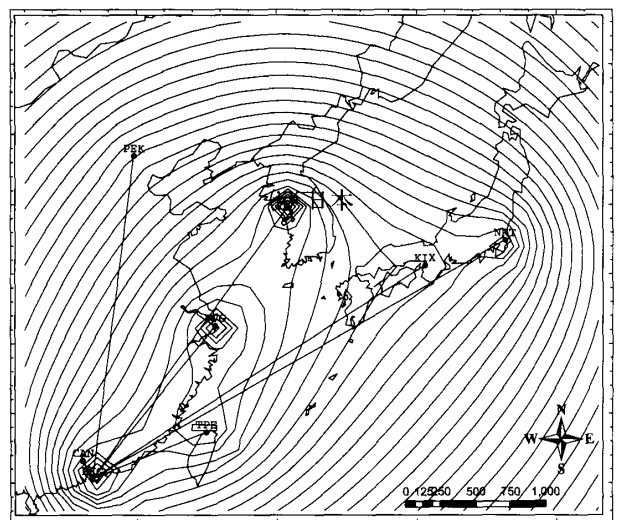
2007年のデータを用いて式(1)の目的関数値を計算し、等費用曲線を描画すると、図8のようになる。それぞれの最適点を求めた結果は、表2のようにまとめられる。

ウェーバー点は、輸送距離弾性値 $\beta=1$ であることから、等費用曲線が単峰で上海空港周辺の内点解となった。なお、図7における2007年のウェーバー点とは一致している。

一方、両国ともに、輸送距離弾性値 $\beta < 1$ であるので、等費用曲線が単峰となる保証はないため、局所最適解が生じることとなる。日本は、上海空港 (PVG) の端点解となっており、輸送距離弾性値 β の値も近いため、ウェーバー点と最適点の位置が非常に近くなっている。アメリカは、最も需要量の多い香港空港 (HKG) の端点解となっており、輸送距離弾性値 β がかなり小さいため等費用曲線が複雑な形状となっている。



(ii) 日本



(iii) アメリカ

図8 東アジアにおける最適点

表2 東アジアにおける最適点

	種類	分類	地点
(i)	ウェーバー点	内点	上海 (PVG) 近辺
(ii)	アメリカ	端点	香港 (HKG)
(iii)	日本	端点	上海 (PVG)

5. まとめ

本研究では、航空輸送における現実の輸送需要および輸送費用のデータを用いて、施設配置問題としてモデル化した上で、輸送費用関数の違いによる航空貨物ハブの最適配置に与える影響について考察した。

輸送費用関数に輸送量と輸送距離に関する規模の経済性を考慮した一般化ウェーバーモデルを用いて、輸送費用を最小とする航空貨物におけるハブ空港の最適配置について分析を行った。まず、規則的な需要点分布を対象に分析した結果、輸送量に関して比例関係が強くなるほど、または輸送距離に関して比例関係が弱くなるほど、需要量の多い地点が最適点となることが明らかになった。さらに、一次元と二次元で結果が異なることから、空間的な性質による違いが明らかになった。

そして、東アジアにおける航空貨物データを対象に分析を行い、各国の運賃体系の違いにより最適点が異なる結果となった。通常のウェーバーモデルから、ウェーバー点が西へとシフトしていることから、1990年代から韓国、中国での貨物取扱量の増加について、地図上に可視化することができた。日本の推定結果を用いると、固定費が低く、輸送量と輸送距離に比例した輸送費用関数であるため、ウェーバー点に近い上海空港が最適点となった。一方、アメリカの推定結果を用いると、固定費が高く、輸送量に比例した輸送費用関数であるため、需要量が最も多い香港空港が最適点となった。この結果は、大手インテグレータが珠江デルタ地帯に貨物ハブを配置していることと合致している。

今後より現実的な分析のためには、詳細な OD データや着陸料などの他のコスト要因、各種規制を考慮する必要がある。

参考文献

- [1] Ballou, R. H.: Business Logistics Management, Prentice-Hall, 1999.
- [2] Beasley, J. E.: OR-Library: distributing test problems by electronic mail, *Journal of the Operational Research Society*, 41, 1069-1072, 1990.
- [3] Drezner, Z. and Hamacher, H. W.: *Facility Location*, Springer, 2002.
- [4] Higginson, J. K.: Modeling shipper costs in physical distribution analysis, *Transportation Research A*, 27(2), 113-124, 1993.
- [5] Informa: Containerisation International Yearbook, 各年度.
- [6] Alumur, S. and Kara, B. Y.: Network hub location problems: The state of the art, *European Journal of Operational Research*, 190, 1-21, 2008.
- [7] O'Kelly, M. E.: The location of interacting hub facilities, *Transportation Science*, 20, 92-106, 1986.
- [8] Watanabe, D., Majima, T., Takadama, K. and Katuhara, M.: Generalized Weber model for Hub Location of Air Cargo, *The Eighth International Symposium on Operations Research and Its Applications*, Lecture Notes in Operations Research, 10, 124-131, 2009.
- [9] 大澤義明, ドミニク・ペータース, 古藤浩: 一般化ウェーバーモデルにおける大域的最適点に関する研究, *地域施設計画研究*, 15, 29-36, 1997.
- [10] 木村達也: 貨物ゲートウェイ空港の国内立地のための方策—アジアの活力を取り込んだ経済成長向上に向けて—, *Economic review*, 13(2), 47-70, 2009.
- [11] 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, 2000.
- [12] 全日本空輸株式会社 ANA CARGO ホームページ: <https://www.ana.co.jp/cargo/ja/int/okinawa/> (2010/8/16 現在閲覧可能)
- [13] 日本航空協会: 「航空統計要覧」, 各年度版.
- [14] 日本物流団体連合会: 「物流サービスに係る内外価格差調査報告書」, 2007.
- [15] 矢部眞: 工場配置の問題, *オペレーションズ・リサーチ*, 3, 37-42, 1958.