

航空貨物輸送市場分析に関する一考察

竹林 幹雄¹

¹正会員 神戸大学大学院海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

E-mail: takebaya@kobe-u.ac.jp

本稿では、航空貨物輸送市場分析の変遷について概観し、航空貨物輸送市場分析の特徴について整理を試み、さらに航空貨物輸送市場の特徴を反映したモデルを提案することを目的とする。まず、航空貨物輸送市場分析においては、十分な分析データの収集が困難であったことから、実証分析よりもむしろ理論、応用分析から発達したことを指摘した。次に航空貨物輸送市場の特徴を反映したモデルの提案に関しては基本モデルとしては価格弾力性を有した需要関数を元としたカーゴキャリアの利潤最大化モデルを提案した。ただし、この利潤最大化モデルには需要を所与とした輸送費用最小化問題が下位問題として組み込まれる形式を提案した。

Key Words : air cargo transport, optimization, network design

1. はじめに

航空輸送市場の世界的な規制緩和・自由化の中で、航空貨物輸送はとりわけ自由化の先鞭として位置づけられてきたといつてよい。例えば、米国国内航空輸送市場における規制緩和（Deregulation Act）では、初期の段階から航空貨物輸送に関する規制はほぼ撤廃されていた。欧州における自由化においても、旅客輸送に先立って貨物輸送での自由化を積極的に進めたという経緯がある。このように航空貨物輸送は自由化された輸送市場の中でも際だって自由な競争を行ってきたと考えられる。言い換えると、航空会社の『知恵』が最大限に利用されてきた分野だといえよう。

一方、航空貨物輸送市場は航空会社の空港選択、すなわち『ハブ』『ゲートウェイ』の選択による影響が強い。言い換えると当該市場は航空会社主導により動いていると言えることができる。代表的な例はインテグレートド・キャリア、いわゆるインテグレーターズの空港選択が該当する。最近の事例ではFedExの極東ハブ選択として関西空港、仁川空港が競合し、結果として関西空港が選択されたことがこれに該当するであろう。これに関しては積極的なエアポートセールスが行われたと考えられるが、結果としてなぜ関西空港が選ばれたのか、という点では

詳しくは報道されていない。

前述のように、航空貨物輸送市場は航空会社主導の色合いが強いため、ハブとして選択されるかどうか、は空港の経営そのものに大きく影響する。しかし、どのようにしてハブが選択されるのか、については、例えばO'Kelly¹⁾²⁾をはじめとする古典的なハブ・スポーク型ネットワーク構成理論³⁾以外、あまり見当たらない。特に、輸送の条件によって需要が変動するのが通常であるが、前出のネットワーク構成理論に範を取る方法論では、需要は常に与件である。この点において理論的に改善する余地があると考えられる。また、複数の空港間でハブの誘致合戦を行う場合も同様に分析となることはほとんどなかった。この点においても方法論としての改善の余地があろう。

また、航空貨物輸送市場は長年理論的な考察対象として取り上げられることは少なかった。これは後述するように、まずデータの集積が十分でなかったこと、そして市場構造の特殊性によるものと考えられる。しかし、近年の急速な理論・実証研究の成果は、さまざまな政策分析を行うために必要な新しいネットワーク分析モデルの構築には非常に大きな力となることが期待されるが、現段階ではそういった試みは少ない。

本研究は以上のような問題意識に鑑み、航空貨物

輸送市場分析の経緯を振り返るとともに、航空貨物輸送市場の特徴を反映した市場モデルの提案を行う。さらにその応用として、複数空港がそれぞれ独立に経営を行っている場合を取り上げ、ハブ空港成立の条件について均衡理論に基づき分析を行うとともに、OD需要のポテンシャルの違い（具体的には需要関数の違い）による成立条件への影響を考察する。なお、本稿では定式化までを示すものとする。

2. 航空貨物輸送市場分析の現状

航空貨物輸送市場分析は輸送ネットワーク構成理論が主流であると言っても過言ではない。ネットワーク構成理論は旅客・貨物にかかわらず前出のO'Kelly¹²⁾の研究が古典として取り上げられることが多い。この発展型がCampbell³⁾のP-median問題を用いたハブ立地理論である。貨物輸送はこういった「ネットワーク上でどのように貨物の輸送計画を立てることが合理的か」という実務的な要求に応える形で主としてOR分野¹⁾で継続的に研究⁴⁾されてきた。近年ではサプライチェーン・マネジメント関連としての研究⁶⁾やレベニュー・マネジメントの一環としての研究⁷⁾も行われている。

航空貨物輸送市場形成に関する理論的考察もいくつかなされており、これは交通経済学の主要な方法論に従ったアプローチを取るものが多い。例えばZhang and Zhangによる旅客輸送市場との違いを考慮した貨物輸送市場での自由化に関する理論的考察⁸⁾は方法論も含め、後の理論研究に大きな影響を与えたといえる。

一方、実証レベルでの分析はあまり進んでいなかった。これは航空貨物輸送市場に関するデータが最近まで非常に入手することが難しかったためであることが大きな比重を占めると考えられる。例えば、航空貨物輸送データに関しては、わが国発着の国際航空貨物に関しては2年ごとに行われる「国際貨物動態調査」があるが、海外乗り継ぎなど経路の詳細な情報が記載されるようになったのは平成24年度発行版からである。海外のデータではICAOが毎年発行しているOn Flight Origin and Destination/OFODやTraffic by Flight Stage/TFなどがよく知られているものの、これらはOD貨物情報、リンク情報に限定されており、経路流動に関する分析を行うためには情

報は十分ではない。品目別情報など、詳細情報はなく、基本的に重量表示のみである。IATAの発行するCargoについては、国間の輸送実績が整理されるにとどまっている。また、最も得ることが困難な情報としてはタリフがある。標準価格はOFGなどで整理されているものの、平均価格など実証分析には欠かせない情報を入手することが極めて困難である。

このように限られた情報のみ利用可能な状況の中でも、最近の10年間では航空貨物輸送に関わる実証研究が急速に進展しつつある。例えば、貨物ハブ成立に関する実証分析⁹⁾¹⁰⁾や産業構造の変化へのカーゴキャリアの対応に関する実証分析¹¹⁾、プロダクションサイクルと航空貨物シェアの関連性の研究¹²⁾、カーゴキャリアのルート選択行動分析¹³⁾など数多くの研究がなされている。

以上考察を行った結果、次のようにまとめることができる。さまざまな航空政策を考える上で、ORに基礎をおくネットワーク分析モデルを構築することは非常に有意義なことであると考えられる。その意味でO'Kellyらのネットワーク構成理論を基礎におくモデル開発がネットワーク分析モデルでは主流となり続けると考えられる。一方、近年急速に成果を上げつつある実証研究から、貨物の需要構造にもいくつかの発見があり、こういった知見をネットワーク分析モデルに反映させることが望まれる。次章ではこの点についてさらに検討を加えることとする。

3. 航空貨物輸送市場のモデル化に関する考察

前章で考察した条件を満たすモデルを本章で提案することとする。ここでは静学モデルについて検討することとしたい²⁾。

まず航空貨物輸送におけるネットワーク構成に関しては、ある会社が持つ需要（与件）をコスト最小で輸送するネットワークの構築、という形式が一般的である⁴⁾¹⁴⁾。これは多くの輸送会社では通常年間の輸送需要のおおよそは把握されており、その需要にしたがって輸送計画を立てることが求められると考えられてきたためである。しかし、需要は輸送条件の変化によって変動する、すなわち弾力的に変化するものであり、輸送会社はそれを見越して行動する

¹⁾ 例えば de Camargo ら ⁵⁾は極めて複雑なハブ・スポーク設計問題を Benders の Cecomposition algorithm を援用して求解する方法を提案している。

²⁾ 動学的な視点では Azadian ら ¹⁵⁾の研究フレームなどを参考にすることができるが、構造が複雑であり、後述するハブの選択などには動学アプローチはそれほど大きなアドバンテージを与えるは考えられない。

ものと考えることが必要であろう．実際，Zhang and Zhangの理論的考察⁸⁾にも同様の仮定がなされており，経済分析では標準的な要求項目と考えてよい．最終的に，求められる市場構造としては

- 1) 輸送需要は輸送サービスに対して弾力的に変化する．
- 2) 輸送計画（配分に相当する）はカーゴキャリアによって行われ，荷主は能動的な経路選択は行わない．

という特徴を持つこととなる．

以上の議論から，次のようなモデルを提案する．本稿で考察対象とする市場は3つの主体で運営されるものとする．すなわちa) 荷主（貨物需要），b) カーゴキャリア（貨物輸送サービス供給），c) 空港管理者（ノード供給），の3主体である．

まず，荷主=貨物需要構造について考える．簡単のため，OD貨物需要 Q_{rs} はOD運賃 p_{rs} にのみ依存して決まるものとする．ゆえに需要関数は以下のように定義することが可能である．

$$Q_{rs} = A_{rs} - B_{rs} p_{rs} \quad (1.1)$$

ここで A, B はODペア rs に固有のパラメータであり，ともに正である．

一方，経路交通量 x_k^{rs} は次の条件を満たす．

$$Q_{rs} = \sum_{k \in K^{rs}} x_k^{rs} \quad (1.2)$$

K^{rs} は rs OD ペアで設定される輸送経路の集合である．さらに，空港間で設定される輸送リンク l における輸送量 x_l に関しては以下の式が成り立つ．

$$x_l = \sum_{rs \in \Omega} \sum_{k \in K^{rs}} x_k^{rs} \delta_l^{rsk} \quad (1.3)$$

Ω はODペアの集合， δ_l^{rsk} は2値変数であり，当該経路がリンク l を使用していれば1，そうでなければゼロを取る．

次にカーゴキャリアについて考える．カーゴキャリアは簡単のため独占企業として営業を行うものとする．彼らは利潤最大化のためにOD運賃 p_{rs} ，および輸送計画 x_k^{rs} を決定するものとする．負担する費用としては輸送規模 x_l に伴う輸送費用 C_l ，ならびに空港で貨物にかかる諸経費 $\bar{C}_l$ とする．ただし，ここでは航空機の容量制約は考えないものとし，輸送は貨物1単位ごとに管理できるものとする．

このように独占的なキャリアの存在の元での輸送ネットワーク構成問題は，Hendricks ら¹⁶⁾のハブ・

スポーク/フルネットワーク選択問題と類似の構造を持つことになる．ただし，Hendricksらの提案したモデルでは利用者（モデルでは旅客と定義されている）は経路ごとに独立して定義される，すなわち利用者自身が旅行経路を選択する形式となっており，これは旅客輸送市場のモデルで通常想定されている構造である．しかし，本稿で提案するモデルでは前述のように，利用者（荷主）自らが路線選択行動を行わない，すなわち「輸送そのものは完全にカーゴキャリアに依存する」という構造を取っている．この点Hendricksらの古典的なモデルと異なっている．

さて，輸送計画 x_k^{rs} はOD運賃 p_{rs} に依存して決まるので，次のようなbi-level問題の下位問題として位置づけられる．通常，下位の問題では経路選択行動が組み込まれる¹⁶⁾が，ここでは前述の理由により荷主の経路選択行動は考慮しない．すなわち，ある運賃 p_{rs} が与えられた結果，カーゴキャリアはその需要に対して輸送費用最小となるように輸送計画を決定すればよいということになる．このため次の問題の最適解が最適制約条件として上位問題（カーゴキャリアの利潤最大化問題）に組み込まれることとなる． rs OD ペアの経路 k への配分割合を ω_k^{rs} ($0 \leq \omega_k^{rs} \leq 1$) とすると，下位問題は以下のような定式化を得る．

$$\begin{aligned} \text{Object : } \min_{0 \leq \omega_k^{rs} \leq 1} \pi_{Low} \\ &= \sum_l (C_l(x_l) + \bar{C}_l(x_l)) \\ &= \sum_l (C_l(\sum_{rs} \sum_k Q_{rs} \omega_k^{rs}) + \bar{C}_l(\sum_{rs} \sum_k Q_{rs} \omega_k^{rs})) \end{aligned} \quad (1.4)$$

Subject to

$$\sum_k \omega_k^{rs} = 1, \omega_k^{rs} \geq 0 \quad (1.5)$$

なお，この定式化は交通工学でいう『システム最適配分』と全く等価であるので，システム最適配分のアルゴリズムにより解を得ることは容易である．

次に，カーゴキャリアの上位（主）問題である利潤最大化は次のように定式化される．

$$\begin{aligned} \text{Object : } \max_{p_{rs}} \pi_{High} \\ &= \sum_{rs} \sum_k p_{rs} x_k^{rs} - \sum_l (C_l(x_l) + \bar{C}_l(x_l)) \\ &= \sum_{rs} Q_{rs} p_{rs} - \sum_l (C_l(x_l) + \bar{C}_l(x_l)) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Subject to (1.4)

以上が市場モデルの基本モデルである³。続いて分析目的別に組み込まれる行動モデルについて述べる。ここでは、カーゴハブの誘致、すなわちカーゴキャリアの誘致問題の際、検討対象とされる空港経営を取り上げる。空港 h が私企業によって運営されている場合を考える。ここでは利潤最大化を目指すとして良く、貨物1単位あたりの課金（ないしはインセンティブ料）はカーゴキャリアの運航する国際線リンク l の輸送量 x_l に依存して決まる。ゆえに空港 i の利潤最大化問題は以下ようになる。

$$\text{Object: } \min_{q_h^{c1}, q_h^{c2}} \Lambda^i = \sum_l \left(q_h^{c1} - q_h^{c2} \right) \sum_{rs} \sum_k x_k^{rs} \delta_l^{rsk}, \quad (1.7)$$

Subject to

$$\begin{aligned} \text{Object: } \max_{p_{rs}} \pi_{High} \\ &= \sum_{rs} \sum_k p_{rs} x_k^{rs} - \sum_l (C_l(x_l) + \bar{C}_l(x_l)) \\ &= \sum_{rs} Q_{rs} p_{rs} - \sum_l (C_l(x_l) + \bar{C}_l(x_l)) \end{aligned} \quad (1.8)$$

q_h^{c1} は空港 h での課金額、 q_h^{c2} は同じくインセンティブ料である。

4. おわりに

本稿では航空貨物輸送の特性を考慮したモデルの提案、および必要な条件の整理を行った。講演時には数値計算を通じて、モデルの挙動特性についての紹介を行う。

参考文献

- 1) O'Kelly, M.E. Quadratic integer program for general hub location, *European Journal of Operational Research*, 32, 393-404, 1987.
- 2) O'Kelly, M.E., Bryan, D., Skorin-Kapov, D. and Skorin-Kapov, J.: Hub network design with single and

- multiple allocation: a computational study, *Location Science*, Vol.4, No.3, 125-138, 1996.
- 3) Campbell, J. F.: Hub location and O-hub median problem, *Operations Research*, 44, No. 6, 923-935, 1996.
- 4) Tang, C. H., Yan, S., Chen, Y. H.: An integrated model and solution algorithms for passenger, cargo, and combi flight scheduling, *Transportation Research E* 44, 1004-1024, 2008.
- 5) De Camargo, R. S., De Miranda, G., Luna, H. P.: Benders decomposition for hub location problems with economies of scale, *Transportation Science*, 43, No. 1, 86-97, 2009.
- 6) Oum, T. H., Park, J. H.: Multinational firms' location preference for regional distribution centers: focus on the Northeast Asian region, *Transportation Research E* 40, 101-121, 2004.
- 7) Alumur, S. A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F.: Hub location under uncertainty, *Transportation Research B* 46, 529-543, 2012.
- 8) Zhang, A., Zhang, Y.: A model of air cargo liberalization: passenger vs. all-cargo carriers, *Transportation Research E* 38, 175-191, 2002.
- 9) Zhang, A.: Analysis of an international air-cargo hub: the case of Hong Kong, *Journal of Air Transport Management* 9, 123-138, 2003.
- 10) Kim, J. Y., Park, Y.: Connectivity analysis of transshipments at a cargo hub airport, *Journal of Air Transport Management* 18, 12-15, 2011.
- 11) Hsu, C. I., Li, H. C., Liao, P., Hansen, M.: Responses of air cargo carriers to industrial changes, *Journal of Air Transport Management* 15, 330-336, 2009.
- 12) Murakami, H., Matsuse, Y., Mukaigawa, K., Tsunoda, Y.: Production lifecycle and choice of transportation modes: Japan's evidence of import and export, Discussion paper 2013-28, Graduate School of Business Administration, Kobe University, 2013.
- 13) Ohashi, H., Kim, T. S., Oum, T. H., Yu, C.: Choice of air cargo transshipment airport: an application to air cargo traffic to/from Northeast Asia, *Journal of Air Transport Management* 11, 149-159, 2005.
- 14) Lu, H. A., Chen, C. Y.: A time space network model for unit load device stock planning in international airline services, *Journal of Air Transport Management* 18, 94-100, 2011.
- 15) Hendricks K, Piccione M, Tan G.: The economics of hubs: the case of monopoly. *The Review of Economic Studies* 62; 83-99, 1995.
- 16) Takebayashi, M.: Network competition and the difference in operating cost: Model analysis, *Transportation Research E* 57, 85-94, 2013.
- 17) 柴崎隆一, 渡部富博, 家田仁: 船社・荷主の最適化行動を考慮した国際海上コンテナ輸送の大規模シミュレーション, *土木学会論文集D3*, Vol. 67, No. 4, 455-474, 2011.

³ なお、キャリアの目的関数に貨物配分による費用最小化問題を組み込んだ研究に柴崎らの海上輸送モデル¹⁷⁾がある。柴崎らのモデルでは目的関数内で貨物配分による費用最小化と運賃制御による利潤最大化を同時決定問題として定式化されており、本稿で提案するモデル、「所与の需要に対する費用最小化」すなわち「運賃決定を上位問題、費用最小化フロー算出を下位問題」とする bi-level 型構造とはモデルの構造そのものが異なる。

HOW TO APPROACH TO MODELLING AIR CARGO TRANSPORT MARKET?

Mikio TAKEBAYASHI

This paper aims to review the history of researches in air cargo transport and propose the air cargo transport market model with reflecting the characteristics pointed out by former researches. First, we point out that in order to build the model suitable for analyzing the air cargo transport market as a network design problem, combination of network design problem and elastic demand model is needed. Second, we propose the bi-level model of air cargo carrier behavior which consists of upper part of profit maximization problem and lower part of cost minimization problem.