

航空ネットワーク分析技法上の課題

An Overview of Airline Network and Aircraft Scheduling Problems

徳 永 幸 之*

by Yoshiyuki TOKUNAGA

Airline network and aircraft scheduling are very important concerns not only of an airline but of an airport planner as well. This paper presents an overview of airline network problems and aircraft scheduling problems. These are presented from an airport planner's point of view, which is unique to Japan. In both problems, it is important that the behavior of passengers be taken into account.

1. はじめに

航空ネットワーク及び運航スケジュールの決定は、航空会社における数多くの計画課題の中でも最も重要な課題の一つである。世界的な航空規制緩和の流れの中で、需要が多く運航効率の良いネットワーク及びスケジュールの作成が不可欠であり、これらに関する研究が航空会社内外で盛んに行われてきた。

一方、土木計画の分野においても航空ネットワーク及びスケジュールに関して無関心ではいられない。現在、わが国においては羽田、成田といった基幹空港の混雑と地域振興を目指した地方空港の整備が問題となっている。現在の一極集中型のネットワーク構造を階層型とし、中型機による乗り入れを大型機に集約できれば基幹空港の混雑を緩和できよう。また、需要が比較的少ない地方空港においては、新規路線の開設や地域航空の導入が困難な状況にあるが、乗り継ぎを考慮したネットワークや効率的な運航スケジュールが構築できればその実現可能性は高まる。このように、ネットワーク及びスケジュールの構築は空港整備と密接な関係にあり、これらのモデル開発は空港整備の視点からも非常に重要である。

本論文では、従来の航空ネットワーク及びスケジュールリングに関する研究を整理し、わが国における特殊性をも考慮して、空港整備の視点からこれらの問題における研究課題の抽出を行う。

*ワース：航空ネットワーク，スケジュールリング

*正会員 東北大学助手 大学院情報科学研究科

2. 航空ネットワークのスケジューリング問題

航空会社によるスケジュール策定の流れは図-1に示すとおりである。まず、輸送実績の分析に基づき、空港、機材等の制約条件や市場の動向などを加味して路線便数計画が作成される。これを基本としてスケジュールの原案が機材繰りを含めて作成される。これに空港発着枠等の制約や乗員繰り、整備計画等の調整を経て最終案が作成される。このように、スケジュール策定過程は様々な要素が複雑に絡み合っているため、個々の段階ではオペレーションズ・リサーチ的試みが種々提案されているが、全ての過程を自動的に行うシステムは開発されていない。

航空会社におけるスケジューリングでは空港の配置や規模を所与としているが、政府を含めた航空ネットワークの計画問題においては空港計画も重要な要素である。また、これらの計画に最も重要な影響

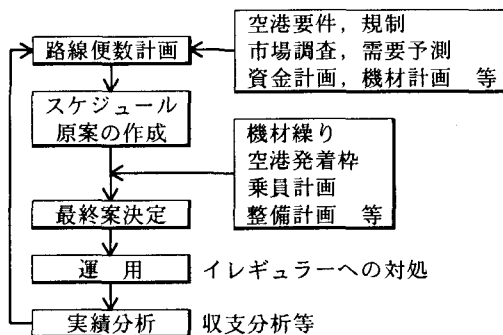


図-1 スケジュール策定の流れ

を与えているのは需要，すなわち利用者の行動である。したがって，航空ネットワークのスケジューリング問題は，図-2に示すように政府，航空会社，利用者からなる最適化問題と考えることができる。ここでは航空ネットワークのスケジューリング問題を便宜上ネットワーク問題とスケジューリング問題に分けている。ネットワーク問題は政府による空港配置・規模計画とそれに基づく航空会社のルート構成に関する問題である。スケジューリング問題はネットワーク問題で決定されたルートと利用者の需要予測に基づく運航頻度とスケジュールの決定問題である。スケジュールの決定は一般にスケジュールの作成と評価の繰り返し作業となる。また，決定されたスケジュールによっては需要予測時とサービスレベルが異なるため，需要予測を修正する必要がある。さらに，需要の変化は空港配置やルート構成にも影響を与える。このように航空ネットワークのスケジューリング問題はいくつかのフィードバックループを持つ複雑な問題となっている。

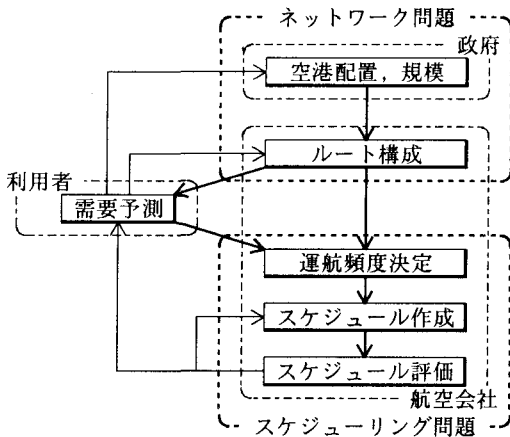


図-2 航空ネットワークのスケジューリング問題

3. 航空ネットワークに関する研究

航空ネットワークに関する研究には，ネットワークの形態を分析するもの，航空会社の行動に関するもの，及びネットワーク構築に関するものがある。

a) ネットワーク形態に関する研究

計量的交通地理学においては，グラフ理論を用いてネットワークの連結度を測定し，ネットワークの

発展度合いの地域間及び時系列の比較が行われた。1970年代になると結節点の近接性を測定する研究が盛んになり，近接性の変化と地域発展との関連について研究されるようになった。また，交通圏設定や結節構造の把握に関する研究も行われている。²²⁾たとえば，宮城(1972)²³⁾は米国航空ネットワークの結節機能の構造について分析を行い，Ghafour & Lam(1986)²⁴⁾は米国における航空規制緩和(1978)前後の近接性を比較し，規制緩和後の近接性が良くなったことを示した。藤目(1987)²⁵⁾は米国の航空規制緩和が地域の結節構造に与えた影響について考察した。

b) 航空会社の行動に関する研究

1978年の米国航空規制緩和は劇的な変化をもたらした。航空会社にとっては効率的な航空ネットワークを構築する必要性が高まり，機材運航効率の向上と高頻度サービスの提供が可能となるハブ&スポーク型のネットワーク化が進んだ。その一方で，ハブ空港では混雑に伴う遅れ等が問題となった。

Schwieterman & Spencer(1986)²⁶⁾はハブ&スポーク型への移行に対して直行便運航の可能性について検討している。Jeng(1987)²⁷⁾やPhillips(1987)²⁸⁾は需要レベルやネットワーク規模，都市の数といったネットワークのパラメーターがルート設定に与える影響について分析している。Hansen(1989)²⁹⁾は異なるネットワーク形態を持つ航空会社間の競争をゲーム理論による記述を試みている。Wheeler(1989)³⁰⁾はハブ&スポーク型ネットワークの長所と短所を整理し，ハブ空港の位置選定及びネットワークデザインの考え方を述べている。

一方，ハブ空港の混雑問題に関する研究として，Kanafani & Ghobrial(1985)³¹⁾は空港における混雑料の設定が便数や遅延，空港収入等に与える影響を分析している。Oumら(1992)³²⁾は社会的に最適な空港料金設定のモデルについて考察している。

c) ネットワーク構築に関する研究

効率的な航空ネットワークを構築するためのモデル及びネットワークの評価に関する研究が，ハブ&スポーク型を中心に行われている。

O' Kelly(1986)³³⁾はハブ空港の最適配置を費用最小化問題として定式化した。Kuby & Gray(1993)³⁴⁾は航空貨物流動を対象として階層的なハブを持つネットワーク計画問題を混合整数計画法により解いて

いる。森ら(1991¹⁵⁾, 1992¹⁶⁾)はハブ&スポーク型ネットワークの構築をハブ空港配置による運航効率の最大化問題としてモデル化し、また、需給メカニズムに基づいた航空市場モデルを構築することにより、ネットワーク評価の枠組みを示している。

これらの研究は航空会社の利益を中心に考えたものであるが、利用者の便益を考慮した研究も行われている。上野ら(1988)¹⁷⁾は利用者側からみたハブ&スポーク型ネットワークの利用構造分析を行い、地域航空路線の構築について考察している。武井ら(1991)¹⁸⁾は目的関数に航空会社の便益と利用者の便益を考え、それぞれの最適解が異なることを示している。さらに黒田・大橋(1993)¹⁹⁾は政府、航空会社及び利用者の最適化問題の定式化を試みている。

4. スケジューリングに関する研究

従来の航空機のスケジューリングに関する研究はEtschmaier & Mathaisel(1984²⁰⁾, 1985²¹⁾)により整理されている。すなわち、初期(1970年以前)の研究の多くは数学的に定式化し最適化アルゴリズムにより解くものであった。しかし、モデル上で考慮する問題が増加し、要求されるコンピューターの能力はコンピューターの能力向上以上に増大した。現在の認識では数理計画的な手法でスケジューリング問題を解くことは困難であり、研究の中心は人間とコンピューターのシステムティックな相互システムの開発に向けられている。

スケジュール作成過程には段階法と直接法がある。段階法では、たとえばSimpson(1969)²²⁾は次の5つのモデルに分割して考えている。

- ①機材の購入、売却、リース計画モデル
- ②運航頻度計画モデル
- ③出発時刻決定モデル
- ④各機材の運航計画モデル
- ⑤機団全体の運航計画作成モデル

これらのうち特に②、③、④に関して多くの研究蓄積がある。一方、直接法はこれらを同時に決定しようとするものである。

a) 運航頻度モデル

古典的頻度モデルはDantzig(1963)²³⁾の線形計画モデルである。このモデルはその後多くの研究者により改良が加えられ、非線形の需要及び費用関数を

持つモデルも開発された。また、これらのモデルでは頻度が実数解として得られるため、解を整数化するため整数計画法も用いられている。わが国では田村(1989)²⁴⁾が地域航空を対象に航空会社と利用者の利益の総和を最大化する運航頻度を求めている。

b) 出発時刻決定モデル

どの時間帯にどれだけの人が出発したいかを表す需要分布が分かれば、希望する出発時刻との差を最小化する問題として定式化される。解法には動的計画法等が用いられる。この問題の難しさはルートの性質に左右されることである。需要分布は一般に容量制約や市場戦略の影響を受け、特定が困難である。

c) 機材運航計画モデル

この問題は与えられたスケジュールをいかに少ない機材数で実現させるか、あるいは要求される機材数を減少させるようスケジュールを変更できるかという問題と考えらる。これらはノードをフライトの到着・出発、アークをフライトとしたネットワークにおける巡回路を見つける問題として定式化できる。

d) 直接法

需要・費用関数が時間に敏感な場合、段階法では何度もフィードバックを繰り返さなければならないため、直接法が有効であると考えられる。しかし、直接法においても種々の制約を満たすために初期のスケジュールに修正を加えてゆく必要がある。航空機メーカーをはじめとする研究の多くはコンピューター支援システムの開発に向けられている。

一方、地域航空のような比較的規模の小さいネットワークを対象に、分枝限定法²⁵⁾、線形計画法²⁶⁾、二次計画法²⁷⁾、動的計画法²⁸⁾といった数理計画法を適用した研究も行われている。しかし、これらの方法は規模の拡大とともに最適解を得ることが困難となるため、ニューラル・ネットワーク²⁹⁾や遺伝的アルゴリズム³⁰⁾の適用が試みられている。

5. 今後の研究課題

これまで航空ネットワークの分析やネットワーク形態の特性に関する研究は数多く行われてきたが、実際の需要量を基にしたネットワークの構築に関する研究はほとんど行われていない。従来、規制により固定的であったネットワークは世界的な規制緩和の流れで可変的になり、また地域航空発展のために

も、空港計画を含めた効率的なネットワーク構築モデルの開発が必要である。特に他の交通と比較して航空ネットワークの形成には採算性がより重視されるため、需要予測を含めた量の議論が不可欠である。

また、わが国においては新幹線等の競合交通機関が発達しており、航空の需要は便数や出発時間に敏感である。したがって、需要分布とスケジュールは密接な関係があり、これらを同時に考慮したモデルの実用化が望まれる。そのためには、効率的な解法の開発や需要分布の特定などが課題となっている。

航空ネットワーク分析においては、政府による空港の位置、規模等の計画、航空会社によるルート、機材、頻度、スケジュール、料金等の計画のいずれにも利用者の行動が密接に絡んでくる。今後はこれらの関連を考慮した分析を進めるとともに、利用者の行動自体についても明らかにしてゆく必要がある。

参考文献

- 1) 井上哲次(1990): 航空会社におけるダイヤデータシステムの活用, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 35, No. 9, pp. 517-521
- 2) 村上祐司(1991): 交通流動の空間構造, 古今書院, pp. 7-14
- 3) 宮城真宏(1972): 米国における諸航空交通地域の組織—1959年, 琉球大学教育学部紀要, Vol. 16, pp. 23-53
- 4) Ghafouri, M. & Lam, T. N.(1986): Accessibility in the Deregulated Domestic Airline Network, *Transportation Research Record*, No. 1094, pp. 10-18
- 5) 藤目節夫(1987): アメリカにおける航空規制緩和と結節地域構造の変化, 人文地理, Vol. 39, No. 5, pp. 16-33
- 6) Schwieterman, J. P. & Spencer, F. A. (1986): Alternatives to the Hub: A Survey of Non-stop Air Service Opportunities, *Transportation Research Record*, No. 1094, pp. 1-9
- 7) Jeng, C. (1988): An Idealized Model for Understanding Impacts of Key Network Parameters on Airline Routing, *Transportation Research Record*, No. 1158, pp. 5-13
- 8) Phillips, L. T. (1987): Air Carrier Activity at Major Hub Airports and Changing Interline Practices in the United States' Airline Industry, *Transportation Research A*, Vol. 21A, No. 3, pp. 215-221
- 9) Hansen, M. (1989): Airline Competition in a Hub-Dominated Environment, Noncooperative Game Theory, *Transportation Research B*, Vol. 24B, pp. 27-43
- 10) Wheeler, C. F. (1989): Strategies for Maximizing the Profitability of Airline Hub-and-Spoke Networks, *Transportation Research Record*, No. 1214, pp. 1-9
- 11) Kanafani, A. & Ghobrial, A. (1985): Airline Hubbing — Some Implications for Airport Economics, *Transportation Research A*, Vol. 19A, No. 1, pp. 15-27
- 12) Oum, T. H., Zhang, A. & Zhang, Y. (1992): Cost Recovery in a Hub-and-Spoke Airport Network, *Selected Proc. of the 6th World Conference on Transport Research*, pp. 3021-3032
- 13) Kelly, M. E. (1986): The Location of Interacting Hub Facilities, *Transportation Science*, Vol. 20, No. 2, pp. 92-106
- 14) Kuby, M. J. & Gray, R. G. (1993): The Hub Network Design Problem With Stopovers and Feeders: The Case of Federal Express, *Transportation Research A*, Vol. 27A, No. 1, pp. 1-12
- 15) 森 朝幸・榛沢芳雄・梅沢史章(1991): 国内航空ネットワークの構築に関する基礎的研究, 土木計画学研究・講演集, No. 14 (1), pp. 85-90
- 16) 森 朝幸・梅沢史章・榛沢芳雄(1992): 航空ネットワークの評価方法に関する一考察, 土木計画学研究・講演集, No. 15(1), pp. 609-614
- 17) 上野文男・田村 亨・五十嵐日出夫(1988): ハブ&スポーク型航空ネットワーク網に関する考察, 土木学会年次学術講演会概要集, No. 43, pp. 488-489
- 18) 武井雅義・兵藤哲朗・花井岳人(1991): 国内航空ネットワークに関する基礎的分析, 土木学会年次学術講演会概要集, No. 46, pp. 488-489
- 19) 黒田勝彦・大橋忠宏(1993): 最適空港ネットワークモデルの提案, 土木学会年次学術講演会概要集, No. 48, pp. 540-541
- 20) Etschmaier, M. M. & Mathaisel, D. F. X. (1984): Aircraft Scheduling: the State of the Art, *Annual Symposium Proc. of AGIFORS*, Vol. 24, pp. 181-225
- 21) Etschmaier, M. M. & Mathaisel, D. F. X. (1985): Airline Scheduling: An Overview, *Transportation Science*, Vol. 19, No. 2, pp. 127-138
- 22) Simpson, R. W. (1969): Scheduling and Routing for Airline Systems, MIT Flight Transportation Lab. Report, R68-3
- 23) Dantzig, G. B. (1963) (小山沢, 1983): 線形計画法とその周辺, ホルト・サウンダース, pp. 705-731
- 24) 田村 亨(1989): 地域航空サービスにおける社会的最適便数についての考察, 土木計画学研究・講演集, No. 12, pp. 613-618
- 25) 田村 亨・稲野 茂(1987): 地域航空における機材の最適スケジューリング, 土木計画学研究・論文集, No. 5, pp. 155-162
- 26) Daskin, M. S. & Panayotopoulos, N. D. (1989): A Lagrangian Relaxation Approach to Assigning Aircraft to Routes in Hub and Spoke Network, *Transportation Science*, Vol. 23, No. 2, pp. 91-99
- 27) 鬼柳雄一・徳永幸之・稲村 肇(1992): 整数2次計画法による航空機材のスケジューリングモデル, 土木計画学研究・講演集, No. 15(1), pp. 597-602
- 28) 徳永幸之・稲村 肇(1992): ダイナミック・プログラミングによる航空ネットワークのスケジューリングモデル, 土木学会論文集, No. 440/IV-16, pp. 109-116
- 29) 久永健一郎・稲村 肇・徳永幸之(1993): ニューラル・ネットワークの航空機材スケジューリングへの適用 Ver. 2, 土木学会年次学術講演会概要集, No. 48, pp. 538-539
- 30) 金子裕一・田村 亨・杉本博之(1993): 遺伝的アルゴリズムを用いた航空ネットワークのスケジューリング, 土木学会年次学術講演会概要集, No. 48, pp. 808-809