

都市間旅客交通の最適モーダルミックス 検討のための計画モデル

奥村 誠¹・Tirtom HUSEYIN²・山口 裕通³

¹正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 通研2号館152室)
E-mail:mokmr@m.tohoku.ac.jp

^{2,3}学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 通研2号館148室)
²E-mail:tirtom@cneas.tohoku.ac.jp
³E-mail:h-ymgc@cneas.tohoku.ac.jp.

OECDによる環境的に持続可能な交通 (EST) の概念に見られるように、交通システムを考える上で低炭素化や環境負荷の軽減が重要な課題となっている。都市間旅客交通において低炭素化を図ろうとすれば、航空や高速バス等を抑えながらエネルギー消費の少ない鉄道への転換を図ることが課題となる。しかしながら鉄道は線路の整備に時間がかかり固定費用部分が大きいため、運営に必要な旅客を異なるOD間から集約して集めることが必要である。特に全体の需要が縮小傾向にある日本では、航空、鉄道、高速バス相互の乗り継ぎを活用してサービスの重複を避け、残存させる路線の活用を図ることが必要となる。本論文は、このような都市間交通におけるマルチモーダルな利用を活かして環境負荷が小さいネットワークを計画するための数理計画モデルを提案する。

Key Words : *intercity transportation, multi-modal, network design, low carbon*

1. モーダルミックス検討の必要性

(1) 都市間交通の環境負荷軽減

OECDによる環境的に持続可能な交通 (EST) の概念に見られるように、交通システムを考える上で低炭素化や環境負荷の軽減が重要な課題となっている。これまで、都市構造論や都市内交通に関する研究が多く行われてきているが、短距離の航空フィーダー路線を高速鉄道で代替させるアイデアがEUで提案されるなど⁹⁾、都市間交通においても低炭素化や環境負荷の軽減が求められてきている。

省エネ性能やCO₂の排出原単位の違いが大きいかを考えると、都市間交通における対策は、いかに航空や高速バスから鉄道に置き換えるかということになる。

(2) 鉄道のサービス特性

シェアを転換させるためには鉄道システムへの投資により高速鉄道化を促進する必要があるが、新線建設にしても従来の路線の改良にしても、連続的な空間を整備するために時間がかかるうえ、固定的な費用が大きくなる。したがって長期的に安定して鉄道の需要が見込める区間にしか投資ができないため、慎重に需要の伸びを待つ

後追いの整備を始めることになりやすく、先行的、戦略的な高速鉄道の整備が難しいという問題があった。

しかし鉄道には、途中駅に停車していろいろなOD間の交通を拾い上げることができるという特徴がある。また航空のようなセキュリティチェックなどの煩瑣な手続きがなく、到着時刻の安定性、信頼性に優れているため、複数の列車を乗り継ぐことが容易である。これらの特徴から、単一のODでは十分な量の旅客数が集まらない場合でも、複数のODペアの旅客をまとめることによって固定的な施設整備費用部分を賄い、CO₂削減ができる可能性がある。

(3) 本研究の目的

以上のように、都市間交通の分野でEST化を進めるには、単一のODごとの各モード事業者間の自由競争を前提として、炭素税などで部分的に補正・誘導を行うという方策には限界がある⁹⁾。むしろネットワーク全体を視野に入れて複数OD間の旅客の機関分担をどのように行うかを検討した上で、その実現のための誘導施策をデザインしていくことが必要となる。

本研究ではこのような検討を行うための数理計画モデルの提案を行う。

2. 関連研究と計画モデルの基本構成

(1) 最適ネットワーク設計の既存研究

交通ネットワークの最適設計に関する研究は、まず道路ネットワークにおいて進展した。道路交通では、混雑に伴う通過時間の伸長に伴い経路利用率が変化するが、そのメカニズムが数理最適化問題として定式化できることから、その外側にリンクの容量拡大を付加した2段階最適化問題を記述することが容易であった。

一方、公共交通を対象とする場合には、リンクの空間的な設定とともに、頻度を計画変数として取り込む必要がある⁸⁾¹⁰⁾。経路の分担率を決める経路の頻度が、計画変数であるリンク頻度の単純な和にならないことや、需要の集中したリンクに頻度の増強がなされてLOSが改善し、それが更なる需要の集中を招くという正のフィードバックループに起因する非凸性があるため、問題が複雑になりやすい。そのため目的地が一つであるような都市内の通勤ネットワーク、あるいは一直線上の鉄道路線を対象とする区間頻度の計画などに限定してモデル化が進められてきた⁹⁾⁴⁾。

さらに、都市間交通ネットワーク全体を対象とする最適化において、施設増強による所要時間の短縮と、頻度の増加を合わせて分析するためには、LOSと整備費用が線形的に対応していないこと、利用者の経路選択行動もLOSの非線形関数になることから、操作変数を離散的に扱ってGA等に持ち込むなどの対応が必要で⁷⁾¹²⁾最適解の唯一性や全域性が保障できないという問題を有している。

利用者の選択行動を捨象できる場合には、ロジスティクス分野で開発されている計画モデルが参考となる。すなわちロジスティクス計画では、各物資をどのモード、どの経路で輸送させるかは計画者側が指定できるため、基本的にはリンク容量制約下での輸送コストと積み替えコストの最小化問題を考えればよいこととなる²⁴⁾。特にネットワークの空間構成に加えてトラックや積み替え作業要員などの資源(アセット)の配置を考えるサービスネットワーク計画問題の解法についても研究が進んでいる³⁾¹¹⁾。

ネットワーク計画問題の目的関数としては、所要時間、輸送コスト、施設の固定費用を含むアセットコストのほか、CO₂排出量などの最小化が考えられる。このような異なるステークホルダーの異なる次元を持つ部分目的関数を一元化して扱う方法として、適当な重みづけで線形結合をとる方法のほか、部分目的の最小達成度を最大化するというミニマックス問題を線形関数として定式化する方法も提案されている³⁾¹³⁾。

(2) 計画モデルの基本構成

本研究では、複数のOD間の旅客数を所与とした上で、これらの旅客を複数のモードからなるネットワーク上に配分して、CO₂排出量を小さくするような各リンクの航空便・列車の頻度を定める問題を考える。このとき、利用者が極端に遠回りの経路に配分されて利便性が低下することを防ぐため、利用者全体の総乗車時間と総乗継コストを小さくすることも考える。すなわち、それぞれの部分目的の達成度を定式化した上で、その最小達成度を最大化するという問題を考える。

また、実行可能性を保証するため、各リンクにおいては通過旅客数を上回る容量を提供する頻度を設定すると同時に、その頻度を維持するコストを上回る収入が得られるようにそのリンクの旅客数を確保するという制約を置く。

なお、ここでは形成されるネットワークと頻度の空間構成に関心があるため、個々の利用者の経路選択行動や個々の事業者の採算性は考慮しない。もちろん本研究のモデルにより得られた利用者の経路配分を実現するためには、経路別に運賃の差を付けて旅客を誘導することが必要であるが、事業者間の金銭のやり取りがキャンセルアウトするように運賃を設定することが可能であるため、別途の問題として扱うことができる。一方、将来の産業・社会状況の変化ならびにODごとに提供されるサービスレベルの差異により、ODごとの需要が変動する可能性があるが、これに対しては別途の検討により信頼性の高い将来のOD交通量を推計して、それを与件として本計画問題を解く、あるいは本問題の解が与えるサービスレベルを見ながらOD需要量を修正し再び本問題を解くというような繰り返し手順が必要となる。

(3) 本モデルの適用場面

都市間交通の環境負荷削減という目的で本モデルの適用が有効となる2つの状況を指摘しておく。

一つは中国、インドや他のアジアの発展途上国のように、今後人口増加、経済成長により都市間旅客交通の需要が大きく増加するケースである。この場合、将来的には高速鉄道ネットワークを導入することが望ましいが、空港さえ整備すれば比較的容易にサービスを開始できる航空に比べ、途中の路線を連続的に整備する必要がある高速鉄道は整備に時間がかかるという傾向がある。一旦航空サービスが提供され旅客がその利便性に慣れてしまうと、先に述べた非凸性があるために、あとで高速鉄道が整備されたとしてもシェアが戻らず、CO₂負荷が大きなシステムに固定化されてしまうという危険性がある。このような場合、OD間のすべての部分が高速鉄道で連結されていないODペアについても、高速バス等をリーダーとして活用することにより旅客を高速鉄道に集め、

より早い時期から高速鉄道の運営を軌道に乗せることが重要となる。このような乗り継ぎ施策の検討には、本モデルが有用であると考えられる。

もう一つの適用場面は、日本のように今後人口減少が進み都市間交通需要が量的に減少し、現存するサービス頻度が維持できなくなる場合である。この時、鉄道は航空に比べ、路線維持にかかる固定費用が大きく、需要が減少してもそれに合わせて便数を減らしたり路線を取りやめたり、再配置を行うことが困難である。そのため、高速バスなどを端末部分に用いながら、より多くのODペアの需要を鉄道路線に集め、サービスの維持を図る政策が必要となる。本モデルはこのような計画の検討に有用であると考えられる。

3. モーダルミックス計画モデルの定式化

(1) 変数およびパラメータ

都市ごとにノード $n \in N$ を置き、それらをつなぐ方向別のアークをモード別 ($m \in M$) に定義する $(i, j) \times m \in A$ 。またモード間の乗り継ぎを明示的に表現するため、各都市ノード n をモード別の着ノード $n_- \times m$ とモード別の発ノード $n_+ \times m$ に区分し、その間に乗り継ぎアーク $(m, m') \times n$ を設定する。一方起終点ゾーン $(k, l) \in K \times K$ 間のOD交通量 T_{kl} を所与とする。

内生変数は旅客の流動を表す4つの変数と、列車・便の設定の有無と頻度を表す2つの変数である。まず、通常のモード別アークに流れる交通量を、起点ごとに定義して X_{ij}^{km} で表す。ノードにおける乗り継ぎ交通量も起点別に定義して $Y_n^{kmm'}$ で表す。このほか、出発地における新規の乗車数をモード別に B_k^m と表し、目的地における各出発地からの到着者数をモード別に A_n^{km} と表示する。一方、列車・便については、アーク、モードごとに、設定の有無を表す0-1変数を Z_{ij}^m で表し、頻度を F_{ij}^m で表す。

外生的に与えるパラメータは以下のとおりである。通常のアークにおけるモードごとの所要時間を t_{ij}^m 、各ノードの一人当たりの乗継ぎコストを $\tau_n^{m m'}$ とする。なお同一モード内での乗り継ぎは、そのノードを乗車したまま通過する場合と区別できないため、乗り継ぎコストは無視できると仮定し、 $\tau_n^{m m'} = 0$ とする。モード別の1便当たりの最大容量を h^m 、最大設定可能頻度を g^m とする。列車や航空便の運航に伴う1頻度あたりのCO₂の排出量を c_{ij}^m とする。さらに、各アークのサービスを維持するためのコストを、固定費用部分と頻度に比例する変動費用部分に分け、それぞれを賄うのに必要な旅客数を、

d_{ij}^m および e_{ij}^m とおく。

(2) 部分目的とミニマックス問題の書き換え

本モデルでは最小化すべき目的関数として、旅客の総所要時間 P 、旅客の総乗継コスト Q 、および運行に伴うCO₂の総排出量 V を取り上げる。

それぞれは、先に定義したパラメータを用いて次のような内生変数の線形式で与えられる。

$$P = \sum_i \sum_j \sum_m t_{ij}^m \sum_k X_{ij}^{km} \quad (1)$$

$$Q = \sum_n \sum_m \sum_{m'} \tau_n^{m m'} \sum_k Y_n^{kmm'} \quad (2)$$

$$V = \sum_i \sum_j \sum_m c_{ij}^m F_{ij}^m \quad (3)$$

この3つの部分目的関数はそのままではスケールが異なるため統合的に扱うことができない。そこで、それぞれに対して評価の基準値 P_0, Q_0, V_0 と、理想的な値 P^*, Q^*, V^* を設定し、次のように基準値が1、理想値が0となるようにスケールをそろえる。

$$p = \frac{P - P^*}{P_0 - P^*}, q = \frac{Q - Q^*}{Q_0 - Q^*}, v = \frac{V - V^*}{V_0 - V^*} \quad (4)$$

具体的に P_0, Q_0, V_0 としては、現状における値や、別の部分目的関数を単独で最適化した時の当該の部分目的関数の値を用いればよい。また、 P^*, V^* はそれぞれを単独の目的として最適化したときの値を用い、 $Q^* = 0$ とすればよい。

ここで3つの部分目的 p, q, v のすべてを最適化するため、最も劣る目的の達成度を最適にするというミニマックス問題 $\min_{X, Y, B, A, Z, F} \max(p, q, v)$ を考える。この問題は、

3つの部分目的の達成度の最悪値を表わす λ と、十分小さな正の定数 ε を導入すると、以下のような線形目的関数と制約条件の組み合わせによって表現できる。

$$\min_{X, Y, B, A, Z, F} \lambda + \varepsilon(p + q + v) \quad (5)$$

$$p \leq \lambda, q \leq \lambda, v \leq \lambda \quad (6)$$

(3) 制約条件

まず、交通量の保存条件を記述する。

着ノード n における到着交通量について、以下の2式が成立する。

$$\sum_{i \in N^-(n)} X_{in}^{km} = A_n^{km} + \sum_{m' \in M} Y_n^{kmm'}, \quad \forall n \in N, \forall k \in K, \forall m \in M \quad (7)$$

$$\sum_m A_n^{km} = T_{kn}, \quad \forall n \in N, \forall k \in K \quad (8)$$

式(7)は、着ノードに到着した旅客が、そのノードを最終目的地にする旅客とそのノードで乗り継ぎを行う旅客に分かれることを示している。式(8)は、各モードで最終目的地に到着した交通量の和が、OD交通量に等しい

ことを表わしている。同様に発ノード n から出発する旅客について、次の2式が成立する。

$$B_n^m + \sum_{m' \in M} Y_n^{km'm} = \sum_{j \in N^+(n)} X_{nj}^{km},$$

$$\forall n \in N, \forall k \in K, \forall m \in M \quad (9)$$

$$\sum_{l \in K} T_{nl} = \sum_{m \in M} B_n^m, \quad \forall n \in K \quad (10)$$

式(9)は、ある発ゾーンを出発地としてモード m に乗車する旅客と、そのゾーンで乗り換えた旅客が、その発ゾーンからの旅客数に等しいことを表わしている。式(10)は、そのゾーンを出発地とするOD交通量の和は、いずれかのモードを用いて出発することを保障している。

次に便数設定に関する制約条件を記述する。あるアークにモード m のサービスを設定すると決めた場合のみ、具体的に頻度を設定することができる。

$$F_{ij}^m \leq g^m Z_{ij}^m, \quad \forall (i, j) \times m \in A \quad (11)$$

旅客を乗せずに便を動かす「回送」は、CO₂排出を生み出すため合理的ではない。回送を行わない場合には、頻度について次の連続条件が成立する。

$$\sum_{i \in N^-(n)} F_{in}^m = \sum_{j \in N^+(n)} F_{nj}^m, \quad \forall n \in N, \forall m \in M \quad (12)$$

最後にアークごとの各モードについて、頻度と旅客数との関係を記述する。まず旅客数は頻度から計算される容量の範囲内におさまる必要がある。すなわち、

$$\sum_k X_{ij}^{km} \leq h^m F_{ij}^m, \quad \forall (i, j) \times m \in A \quad (13)$$

さらに、頻度を維持するための運営費用に見合う旅客数の条件は、以下のように表現できる。

$$\sum_k X_{ij}^{km} \geq d_{ij}^m Z_{ij}^m + e_{ij}^m F_{ij}^m, \quad \forall (i, j) \times m \in A \quad (14)$$

(4) 定式化のまとめと解法

最後に、変数の定義域として、

$$X_{ij}^{km} \geq 0, Y_n^{km'm'} \geq 0, B_k^m \geq 0, A_n^{km} \geq 0 \quad (15)$$

および、

$$Z_{ij}^m = \{0,1\}, F_{ij}^m \geq 0 \quad (16)$$

が加わる。

以上、式(5)を目的関数とし、式(1)~(4)および式(6)~(16)を制約条件とする問題は、少数の0-1変数 (Z_{ij}^m) を含む混合線形計画問題となる。したがって多くの数学ソフトウェアに実装されている混合整数計画法のプログラムをパッケージを利用して容易に解くことができる。

4. おわりに

本研究は途中段階であり、モデルの定式化に留まった。今後は例題を用いたケーススタディーを通じて、本モデ

ルの有用性を確認していく必要がある。発表会時にはケーススタディーの結果についても報告する予定である。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤(B) 21360239)の成果である。

参考文献

- 1) Andersen, J. Crainic, T.G. and Christiansen M.: Service network design with asset management: Formulations and comparative analyses. *Transportation Research Part C*, Vol. 17, No. 2, pp. 197-207, 2009.
- 2) Balakrishnan A., Magnanti, T. L. and Mirchandani P.: Network design. In Dell'Amico, M., Maffioli, F. and Martello S., editors: *Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization*, pp. 311-334. John Wiley & Sons, New York, 1997.
- 3) Chang, Yu-Hern, Yeh Chung-Hsing and Shen Ching-Cheng: A multiobjective model for passenger train services planning: application to Taiwan's high-speed rail line, *Transportation Research Part B*, Vol.34, pp.91-106, 2000.
- 4) Crainic T.G.: Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, Vol. 122, No. 2, pp. 272-288, 2000.
- 5) Givoni, M. and Banister, D.: Airline and railway integration, *Transport Policy*, Vol.13, pp.386-397, 2006.
- 6) Gonzalez-Savignat, M. : Competition in air transport – the case of the high speed train-, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol.38, pp.77-108, 2004.
- 7) 波床正敏・中川大：遺伝的アルゴリズムを用いた幹線鉄道網構築分析に基づく幹線鉄道政策の課題抽出, 土木計画学研究論文集 Vol.26,no.4,pp.763-774,2009.
- 8) Horn, M. T.: Multi-modal and demand-responsive passenger transport systems: a modeling framework with embedded control systems, *Transportation Research Part-A*, Vol.36, pp.167-188, 2002.
- 9) Horn, M. T.: An expected model and procedural framework for planning multi-modal passenger journeys, *Transportation Research Part-B*, Vol.37, pp.641-660, 2003.
- 10) 飯田恭敬監修, 北村隆一編著：交通工学, 9章輸送サービス供給の解析と設計, オーム社, pp.293-327,2008.
- 11) 片山直登：アセットバランスを考慮したサービスネットワーク設計問題, 流通経済大学流通情報学部紀要, Vol.17, No.1, p29-50, 2012.
- 12) Okumura M. and Tsukai M: Air-Rail Inter-modal Network Design under Hub Capacity Constraint, *Journal of the Eastern Asia Society of Transport Studies* Vol.7(CD-ROM), 2007.
- 13) Qiang Meng, Xinchang Wang: Intermodal hub-and-spoke network design Incorporating multiple stakeholders and multi-type containers, *Transportation Research Part B*, Vol.45, pp. 724-742, 2011.
- 14) Spiess H. and Florian M.: Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks, *Transportation Research Part B*, Vol.23, pp.83-102, 1989.

(2012. 8. 2 受付)

PLANNING MODEL OF OPTIMAL MODAL-MIX IN INTERCITY PASSENGER TRANSPORTATION

Makoto OKUMURA, Tirtom HUSEYIN and Hiromichi YAMAGUCHI

Environmentally sustainable transportation becomes an important issue as well for intercity passenger transportation, where modal shifting from energy consuming airline and bus service, to energy efficient high speed railway is most feasible measure. But due to the less flexibility and fixed to locations of railway improvements, strategic redistribution of network-wide demand onto the improving rail line. This paper presents an optimal modal-mix planning model in intercity passenger transportation, which aims to design a modal mix network of least CO₂ emission and less total travel time, as well as less intermediate transfer cost, under the condition that each service arc transportation mode provides sufficient frequency and capacity corresponding to the number of passenger using the arc, and the condition that each arc can get enough fare income to maintain the frequency of service. Using liberalized formulation technique of minmax problem of multiple purposes, the proposed model is formulated as a mixed integer linear programming model, which can be numerically solved by general solver programs.