

都市間旅客交通ネットワークの最適化に関する研究

A study on optimization of intercity passenger transportation network

細 正隆*

Masataka HOSO

*地域計画学・被災地支援研究室（指導教員：奥村 誠 教授）

Intercity transportation services have a characteristic that the fixed cost is very large. Therefore, it is necessary to construct a network that successfully combines multiple transportation modes. However, since it is different who will bear the fixed costs depending on the country and region, network planning according to the burden is desired. In this research, we propose an optimization model that considers service users to bear a fixed cost assuming a network planning in developing countries. The proposed model introduces a mechanism that produces economies of scale through average cost.

Key Words : intercity transportation, multi-modal, network planning, optimization model, economies of scale

1. はじめに

都市間の交通サービスには、固定費用が非常に大きいという特徴がある。そのため、航空や鉄道、高速バスなど、複数の交通モードを上手く結合させることで、都市間の移動ニーズに長期的に対応できるネットワークを構築する必要がある。

ネットワークの構築という長期的な政策の方向性を決めるためのツールとして、最適化モデルが有用である。先行研究¹⁾では、政府が固定費用を負担すると仮定した最適化モデルを提案したが、国や地域によって誰が固定費用を負担するのかが異なるため、負担者に応じてモデルを使い分けられることが望ましい。特に、発展途上国でのネットワーク計画を考える場合、政府には固定費用を負担して安価にサービスを提供できるほどの財政力は無い。そのため、BTO (Build Transfer and Operate) 方式で利用者から回収した運賃をベースにネットワークを構築していくことになる。

本研究ではこのような状況を想定し、サービスの利用者が固定費用を負担すると考える最適化モデルを提案する。提案モデルは先行研究¹⁾での最適化モデルをベースとして、平均費用を介した規模の経済性を生み出すメカニズムを導入している。また、0-1変数を含む二次錐計画問題として定式化されるため、一般的な最適化ソルバーを用いての分析が可能である。

2. 既往研究

都市間交通ネットワークの評価・最適化に関する研究は数多く存在するが、サービスレベルの変化に伴う旅客の経路の変化をどのように考慮するかが共通した問題となる。村上²⁾や渡邊³⁾は、第K経路探索による事前列挙法を用いている。ただし、複数モードの乗り継ぎを認

める場合、多数の経路の中から少数の経路だけが選ばれることになり、計算上の無駄が大きくなってしまいう可能性がある。Okumura et al.⁴⁾が提案したMulti-modal Network Planning (MNP) モデルは、経路の列挙を内生化し、最適ネットワーク上で最も一般化費用の小さな経路に交通を配分する。この考え方は、発展途上国のように需要規模が拡大する状況で特に役に立つ。

波床・中川⁵⁾や先述のOkumura et al.⁴⁾などのネットワーク最適化に関する研究では、需要を固定的に与えて求解しているものが多い。そのため、サービスレベルの向上に伴うODペアごとの需要変動の可能性に関しては、別途で将来のOD交通量を推定し、これを与件として解く必要があるため手間がかかる。一方、先行研究¹⁾で提案した最適化モデルは需要を内生化しているため、最適ネットワーク形状の導出と、サービスレベルに応じたOD交通量の導出を同時に行うことができる。本モデルも先行研究でのモデルをベースとして定式化する。

3. モデルの定式化

(1) パラメータ, 操作変数

先行研究¹⁾と同様の操作変数として、リンク (i, j) でのモード m の有無を表す0-1変数 Z_{ij}^m 、起点ノード k 別のリンク交通量 X_{ij}^{km} 、ノード n での乗継交通量 $Y_n^{kmm'}$ 、発生交通量 B_k^m 、集中交通量 A_l^{km} 、OD交通量 Q_{kl} 、OD間一般化費用 C_{kl} を用いる。さらに、平均費用による規模の経済性を表現するため、各リンクでの旅客の固定費負担額 P_{ij}^m を追加し、8つの操作変数を考える。

パラメータは9つある。リンクサービス運営のための固定費用を d_{ij}^m 、可変費用は利用者数に比例すると考え e_{ij}^m と置く。また、そのリンクでの輸送可能人数を g_{ij}^m 、所要時間を t_{ij}^m と置く。モード間の乗継時間は $\tau_n^{mm'}$ とす

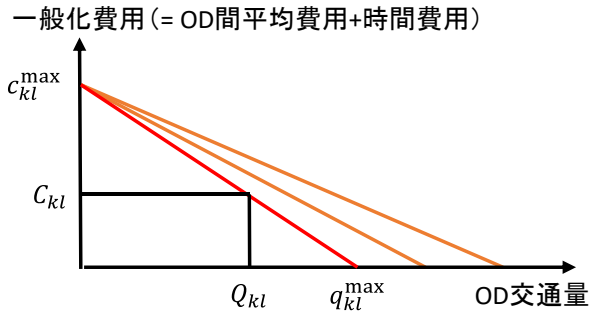


図-1 OD(k, l)の逆需要関数

る。さらに、逆需要関数を定式化するための上限交通量を q_{kl}^{\max} 、支払意思額の最大値を c_{kl}^{\max} と置く。時間価値は一律に v で与える。

(2) 定式化

図-1の赤線で示すように、OD (k, l) ごとに線形の逆需要関数 (式(1)) を与え、消費者余剰 CS_{kl} を二次式 (式(2)) で表す。本研究では、全ての OD ペアに対する合計値である総消費者余剰を目的関数として最大化する。なお、後の分析では図-1のオレンジ線で示すように、上限交通量 q_{kl}^{\max} の値を比例的に変化 (α 倍) させ、複数の需要規模での最適ネットワーク形状を導出する。

$$C_{kl} = c_{kl}^{\max} - \beta_{kl} \cdot Q_{kl} \quad \forall k, l \quad (1)$$

$$CS_{kl} = \frac{1}{2} (c_{kl}^{\max} - C_{kl}) Q_{kl} \quad \forall k, l \quad (2)$$

交通量保存則を式(3)~式(6)により定式化する。本モデルでは、ノード n をモード別の着ノードと発ノードに区分し、その間に乗継リンクを設定している。式(3), (4) が着ノード、式(5), (6) が発ノードでの制約となる。

$$\sum_i X_{in}^{km} = A_n^{km} + \sum_{m'} Y_n^{kmm'} \quad \forall k, n, m \quad (3)$$

$$\sum A_n^{km} = Q_{kn} \quad \forall k, n \quad (4)$$

$$B_n^m + \sum_{m'} Y_n^{kmm'} = \sum_j X_{nj}^{km} \quad \forall k, n, m \quad (5)$$

$$\sum_l Q_{nl} = \sum_m B_n^m \quad \forall n \quad (6)$$

リンクサービスに関する制約を式(7)~式(10)に示す。式(7)はサービスが双方向同時に設定されること、式(8)はリンクの輸送容量を示している。式(9)は固定費用の負担に関する制約であり、サービスの固定費用を上回る利用者からの収入が必要であることを意味する。式(10)は OD 間一般化費用とリンク一般化費用の関係を示す制約であり、左辺が OD 間一般化費用、右辺が順に固定費用、可変費用、所要時間、乗継時間を示している。なお、本モデルではこの関係を起点別に定式化している。

$$Z_{ij}^m = Z_{ji}^m \quad \forall i, j, m \quad (7)$$

$$\sum_k X_{ij}^{km} \leq g_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad \forall i, j, m \quad (8)$$

$$P_{ij}^m \cdot \sum_k X_{ij}^{km} \geq d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad \forall i, j, m \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sum_l C_{kl} \cdot Q_{kl} \geq & \sum_i \sum_j \sum_m P_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km} \\ & + \sum_i \sum_j \sum_m e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km} \\ & + v \cdot \sum_i \sum_j \sum_m t_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km} \\ & + v \cdot \sum_n \sum_m \sum_{m'} \tau_n^{mm'} \cdot Y_n^{kmm'} \quad \forall k \end{aligned} \quad (10)$$

最後に各操作変数の定義域を式(11)に示す。

$$Z_{ij}^m \in \{0, 1\} \quad (11)$$

$$P_{ij}^m, X_{ij}^{km}, Y_n^{kmm'}, A_l^{km}, B_k^m, Q_{kl}, C_{kl} \geq 0$$

本モデルでは式(2), (9), (10)が操作変数どうしの積を含むため、このままでは求解が困難である。計算の際には各制約に式変形を施すことで、0-1変数を含む二次錐計画問題として定式化し直す。なお、本モデルは最適ネットワーク形状の導出に重点を置いているため、旅客の経路選択行動は考慮しないものとする。

4. 最適ネットワーク形状の導出

(1) 仮想ネットワークの設定と計算内容

仮想ネットワークに対して本モデルを適用し、その性質を確認する。仮想ネットワークは航空、鉄道、バスにより構成され、鉄道リンクとバスリンクは図-2で示したノード間で設定可能とする。航空リンクは任意のノード間で設定可能とする。各種パラメータについては各モードの特徴を踏まえて値を設定するが、本研究では輸送容量が十分に大きく混雑は発生しないものとする。また、上限交通量 q_{kl}^{\max} の値を表4のように与える。その他、支払意思額の最大値 c_{kl}^{\max} も OD ごとに与える。時間価値は一律に 50 円/分とする。

本研究では図-1に示したように、全ての OD ペアの上限交通量 q_{kl}^{\max} を一様に α 倍して与え、複数の需要規模での最適ネットワーク形状を導出する。 α は 0.4, 0.45, ..., 1.55, 1.6 の 24 通りとした。

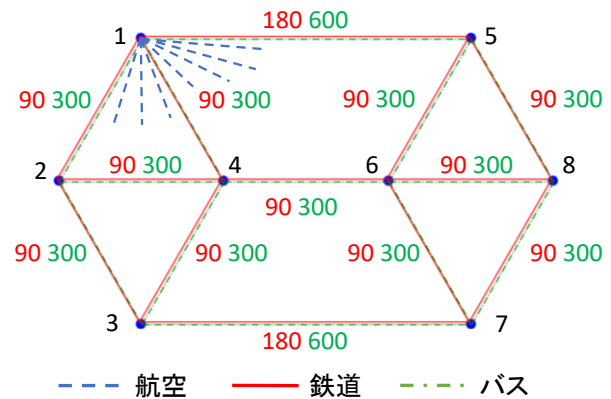


図-2 仮想ネットワーク
※ 図中の各値は鉄道とバスの所要時間 (分)
※ 航空リンクは任意の 2 ノード間で設定可能

表-1 上限交通量 (人/day)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	合計
1	0	2,520	1,260	2,520	1,260	1,260	840	840	10,500
2	2,520	0	2,520	2,520	840	1,260	840	840	11,340
3	1,260	2,520	0	2,520	840	1,260	1,260	840	10,500
4	2,520	2,520	2,520	0	1,260	2,520	1,260	1,260	13,860
5	1,260	840	840	1,260	0	2,520	1,260	2,520	10,500
6	1,260	1,260	1,260	2,520	2,520	0	2,520	2,520	13,860
7	840	840	1,260	1,260	1,260	2,520	0	2,520	10,500
8	840	840	840	1,260	2,520	2,520	2,520	0	11,340
合計	10,500	11,340	10,500	13,860	10,500	13,860	10,500	11,340	92,400

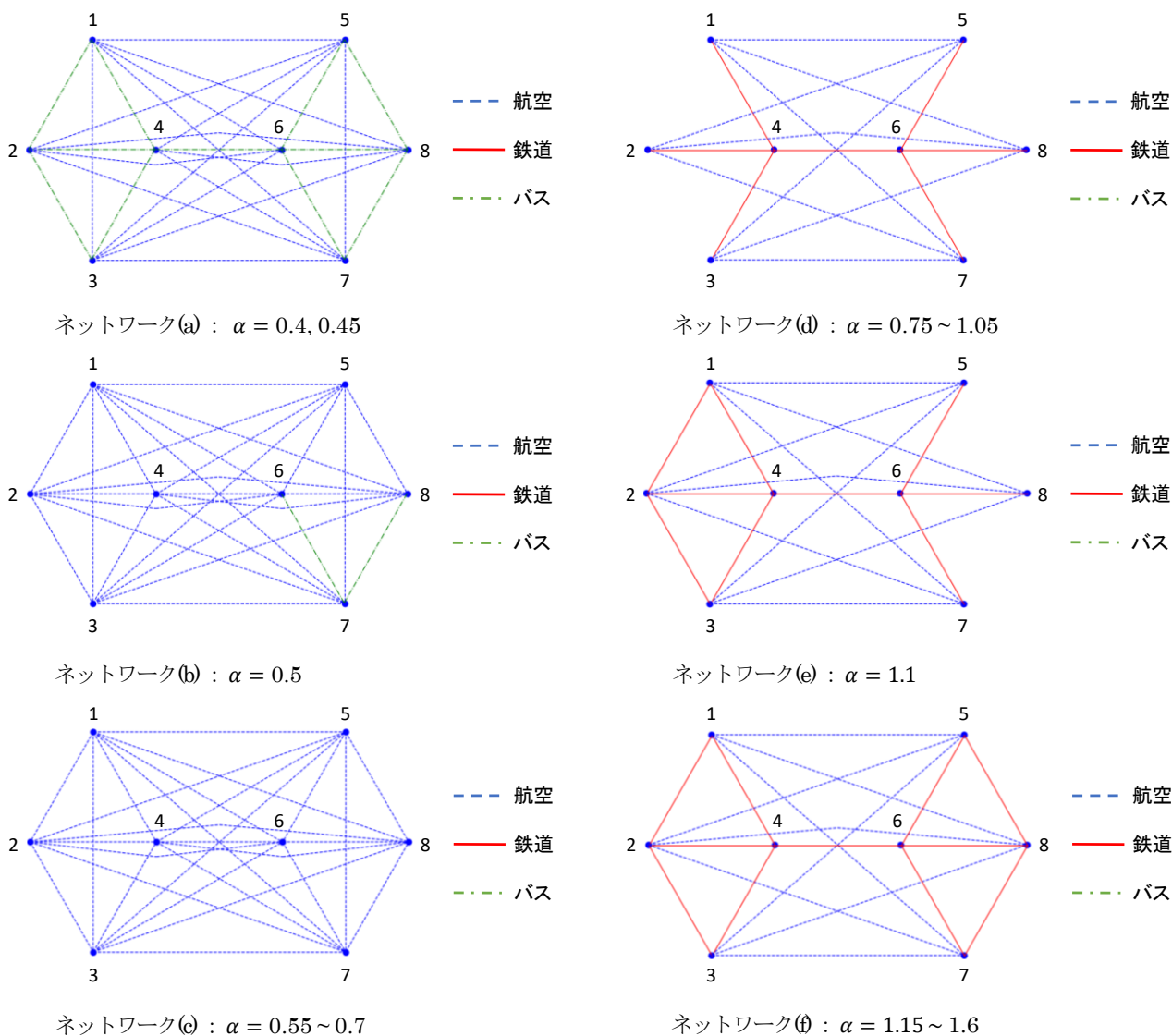


図-3 得られた最適ネットワーク形状

(2) 計算結果と考察

図-3 に示すように、需要規模に応じて 6 種類の最適ネットワーク形状が現れた。需要規模が小さい場合には、図-3(a), (b), (c)のように航空サービスとバスサービスによるポイント to ポイント型のネットワークが構築される。これは各モードの固定費用が比較的小さいため 1 人あたりの負担が大きくなること、航空サービスについては乗り継ぎ抵抗が大きく、直行便を設定するほうが効率

的なためだと考えられる。

需要規模を大きくすると、図-3(d)のように航空サービスと鉄道サービスによるネットワーク形状が現れた。鉄道サービスが設定されるのは、ネットワークの中心部とその中心部を結ぶ区間であり、ハブ&スポーク型となっている。一方、航空サービスについては、図-3(a), (b), (c)に存在した短距離リンクがなくなり、鉄道経路では 3 リンクを要する長距離のノード間でのみ設定される。鉄

道サービスは固定費用が大きく、なるべくたくさんのODペアに利用してもらうことで、旅客1人あたりの負担を小さくする必要がある。そのため、複数のODペアが航空による直行経路から鉄道による迂回経路へと誘導されていると考えることが出来る。ただし、迂回の度合いはODペアによって異なり、OD(1,2)の旅客のように、明らかに大幅な迂回を強いられるODペアも存在する。

さらに需要規模を大きくすると、図-3(e), (f)のように、より多くのノード間で鉄道リンクを設定可能となる。特に、ネットワークの端部に位置するリンク(1,2), (2,3), (5,8), (7,8)が鉄道サービスとして設定されている。

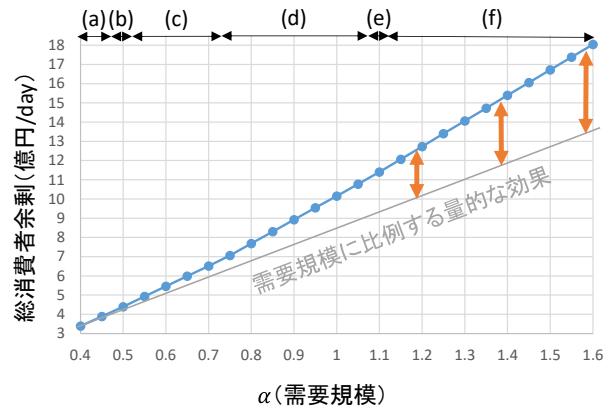
図4は総消費者余剰の推移を示している。需要規模が大きいほど総消費者余剰の値も大きくなるが、その増加の度合いは、図の灰色の線で示した需要規模に比例する量的な効果に伴う増加を上回っていることがわかる。特に $\alpha = 0.4$ の場合と $\alpha = 1.6$ の場合を比較すると、需要規模を4倍に拡大することで、総消費者余剰は約5.3倍に増加する。これは、需要規模が大きくなることで、固定費用は大きいものの利便性の高いサービスを設定可能になることと、全体としてサービスの利用者数が増加することで旅客1人あたりの固定費用の負担が小さくなるためであり、規模の経済性に起因する質的な効果であると考えることが出来る。

図5は、リンク(1,4)での利用者1人あたりの固定費負担額の推移を示している。不連続な推移を示す部分が3か所存在することと、それ以外の部分では需要規模が大きいほど反比例的に値が小さくなっていることがわかる。値が不連続な推移を示すのは、リンク(1,4)のモードが変化するときである。また、鉄道リンクの範囲では、最適ネットワーク形状が図-3(d)から(e)に変化する $\alpha = 1.05 \sim 1.1$ の段階でも値が不連続に推移している。これは、OD(1,2)の旅客がリンク(1,2)を利用可能となり、リンク(1,4)の利用者数が減少するためである。

5. 終わりに

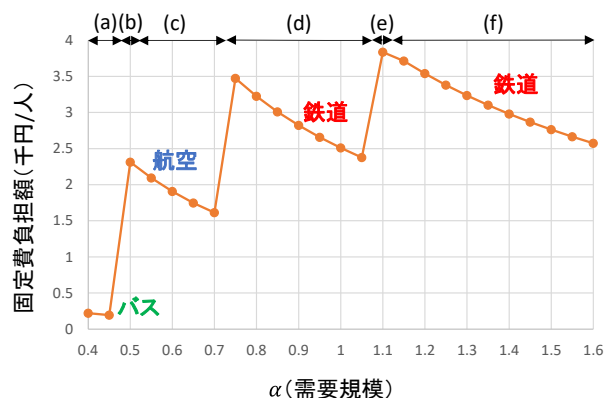
本研究では、発展途上国でのネットワーク計画を想定して、固定費用をサービス利用者が負担すると考える最適化モデルを提案した。提案モデルでは、平均費用による規模の経済性を生み出すメカニズムを導入した。

仮想ネットワークに対して本モデルを適用し、複数の需要規模での最適ネットワーク形状の導出と、総消費者余剰の推移を確認した。最適ネットワーク形状は、需要規模が小さければ航空とバス、需要規模が大きければ航空と鉄道により構成されており、一般的なイメージと一致する解が得られた。また、総消費者余剰の推移を見ると、需要規模に比例した量的な効果だけでなく、規模の経済性に起因する質的な効果も確認することができた。



※ 図上部の表記は図-3の最適ネットワーク形状に対応

図-4 総消費者余剰の推移



※ 図上部の表記は図-3の最適ネットワーク形状に対応

図-5 リンク(1,4)利用者1人あたりの固定費負担額の推移

参考文献

- 1) 細正隆, 奥村誠: 最適な都市間交通ネットワーク形状を分析するための需要内生型モデル, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.I_779-I_786, 2018.
- 2) 村上直樹, 竹内太郎, 奥村誠, 塚井誠人: 航空との補完的サービスを考慮した最適鉄道運行計画, 土木計画学研究・論文集, No.23, pp.629-634, 2006.
- 3) 渡邊拓也, 柴田宗典, 鈴木崇正: 多目的最適化に基づく都市間交通ネットワークの評価方法に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5, pp.I_903-I_916, 2016.
- 4) Okumura, M., Tirtom, H. and Yamaguchi, H.: Planning model of optimal modal-mix in intercity passenger transportation, *Proceedings of International Conference on Low-carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings (LTLGB2012)*, pp. 309-314, 2012.
- 5) 波床正敏, 中川大: 幹線鉄道網の最適化基準が路線網形成に与える影響の比較分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp.I_957-I_966, 2011. (2019年2月1日提出)