

都市間旅客交通ネットワークの最適化に関する研究

東北大学 学生会員 ○細 正隆

東北大学 正会員 奥村 誠

1. はじめに

都市間の交通ネットワークでは、利用者数と利便性の間に「規模の経済性」が働く。先行研究¹⁾では利用者数の増加が、固定費用は大きいものの利便性の高い交通モードの導入を可能にするという「規模の経済性」を考慮できる最適化モデルを提案した。本研究ではさらに、平均費用と平均待ち時間を介した「規模の経済性」を考慮できるように最適化モデルを拡張する。

2. モデルの定式化

(1) 操作変数, パラメータ

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 、起点別のリンク交通量 X_{ij}^{km} 、乗継交通量 $Y_n^{kmm'}$ 、発生交通量 B_k^m 、集中交通量 A_l^m 、OD 交通量 Q_{kl} 、OD 間一般化費用 C_{kl} を用いる。

さらに、規模の経済性を表現するため、各リンクでの頻度 F_{ij}^m 、平均費用 P_{ij}^m 、平均待ち時間 W_{ij}^m を追加する。

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 、可変費用を頻度に比例すると考え e_{ij}^m と置く。また、そのリンクでの設定可能頻度を g_{ij}^m 、1 便当たりの座席数を h_{ij}^m 、所要時間を t_{ij}^m と置く。モード間の乗継時間は $\tau_n^{m'm'}$ とする。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。

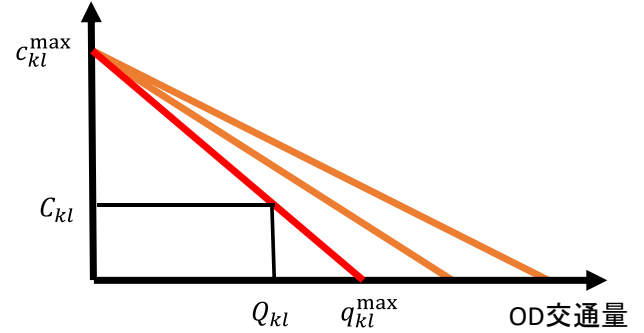
(2) 定式化

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。

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

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

一般化費用 (= OD間平均費用+時間費用)

図-1 OD (k, l) の逆需要関数

交通量保存則を式(3)~式(6)により定式化する。

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

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

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

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

リンクサービスに関する制約を式(7)~式(12)に示す。

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

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

$$\sum_k X_{ij}^{km} = h_{ij}^m \cdot F_{ij}^m \quad \forall i, j, m \quad (9)$$

$$P_{ij}^m \cdot \sum_k X_{ij}^{km} \geq d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m + e_{ij}^m \cdot F_{ij}^m \quad \forall i, j, m \quad (10)$$

$$W_{ij}^m \geq \frac{1}{2} \cdot \frac{18}{F_{ij}^m} \quad \forall i, j, m \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum_l C_{kl} \cdot Q_{kl} \geq & \sum_i \sum_j \sum_m P_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km} \\ & + v \cdot \sum_i \sum_j \sum_m t_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km} \\ & + v \cdot \sum_i \sum_j \sum_m W_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km} \\ & + v \cdot \sum_n \sum_m \sum_{m'} \tau_n^{m'm'} \cdot Y_n^{kmm'} \quad \forall k \end{aligned} \quad (12)$$

キーワード：都市間交通，マルチモーダルネットワーク，最適ネットワーク，需要内生性

連絡先：〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S-502 東北大学災害科学国際研究所 TEL:022-752-2160

なお、式(10)が平均費用、式(11)が平均待ち時間、式(12)が 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る。最後に各操作変数の定義域を式(13)に示す。

$$\begin{aligned}
 &Z_{ij}^m \in \{0,1\} \\
 &F_{ij}^m, P_{ij}^m, W_{ij}^m, X_{ij}^{km}, Y_n^{kmm'}, A_l^{km}, B_k^m, Q_{kl}, C_{kl} \geq 0
 \end{aligned} \quad (13)$$

本モデルでは式(2), (10), (11), (12)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。

3. 最適ネットワーク形状の計算

(1) 仮想ネットワークの設定と計算内容

図-2 のように航空、鉄道リンクを設定可能な仮想ネットワークに対して本モデルを適用する。パラメータは航空、鉄道それぞれの特徴を踏まえた値を設定する。また、時間価値 v は 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 0.75 ~ 1.5 の 16 通りとした。

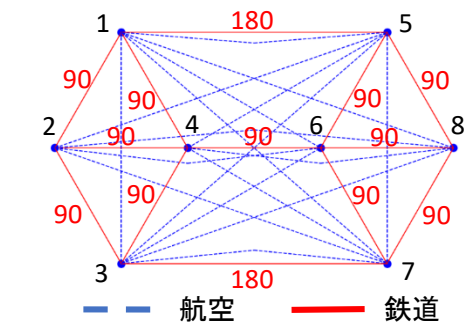
(2) 計算結果と考察

需要規模に応じて、図-3(a),(b)のような 2 種類の最適ネットワーク形状が現れた。(a)は鉄道のみハブ&スポーク型のネットワークである。(b)は鉄道経由では迂回となる OD(1,5), (3,7)の旅客向けに直行の航空リンクが設定されており、需要規模が大きい場合に現れた。

図-4 は総消費者余剰の推移を示している。図のオレンジ線で示した部分は、需要規模に比例する量的な効果では説明できず、規模の経済性に起因する効果を示している。また、図-5 は鉄道リンク(4-6)での平均費用の推移を示している。需要規模と反比例する形で平均費用は減少するが、ネットワーク形状が(a)から(b)に変化する段階で平均費用が不連続に増加している。これは OD(1,5), (3,7)の旅客が航空リンクを利用するようになり、鉄道リンク(4-6)の利用者数が減少することによる。なお、平均待ち時間も同様の傾向が現れた。

4. おわりに

本研究では、都市間交通ネットワーク計画のための最適化モデルを拡張し、計算例を通じてその性質を確認した。規模の経済性を生み出すメカニズムを導入した結果、確かに、需要規模の拡大が比例的な効果以上



※図中の値は鉄道リンクの所要時間（分）

図-2 仮想ネットワーク

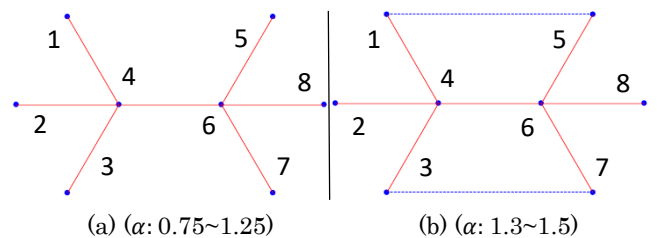


図-3 得られた最適ネットワーク形状

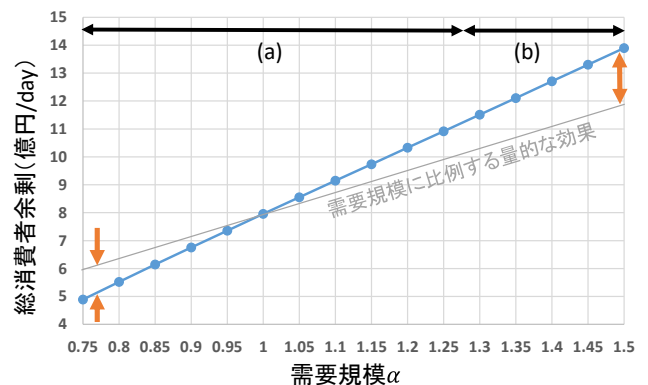


図-4 総消費者余剰の推移

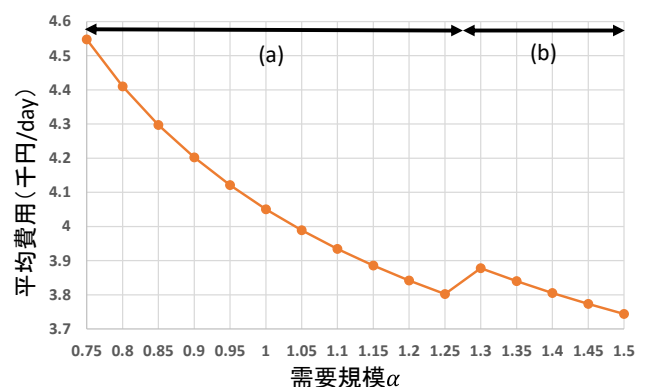


図-5 鉄道リンク(4-6)での平均費用の推移

の総消費者余剰の拡大をもたらすことが確認できた。

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.779-786, 2018.