

費用負担の範囲が最適な都市間旅客交通ネットワーク構造に与える影響

東北大学 学生会員 ○吉田 智貴

東北大学 正会員 奥村 誠

1. はじめに

都市間旅客交通ネットワークの整備において、インフラの建設・償還などの固定費用部分をどう負担するべきかについて議論になる事が少なくない。

本研究では、著者らが開発した戦略的な運賃設定を伴うネットワーク最適化モデルを、費用負担の範囲を変化できるように拡張して、費用負担の範囲の違いが最適なネットワーク構造に与える影響を検討する。

2. モデルの定式化

(1) 操作変数, パラメータ

ノード, 起終点, モード, 事業者, 事業者 h が管理するリンクの集合をそれぞれ, $N, K, M, H, L(h)$ と置く。

操作変数として, リンク (i, j) でのモード m のサービスの有無を表す 0-1 変数 Z_{ij}^m , OD (k, l) 別のリンク交通量 X_{ij}^{klm} , 乗継交通量 $Y_n^{klmm'}$, OD (k, l) 間の交通量 Q_{kl} , 一般化費用の平均値 C_{kl} , 消費者余剰 CS_{kl} , およびリンク (i, j) でのモード m を利用する OD (k, l) 別の運賃負担総額 V_{ij}^{klm} を用いる。パラメータとして, リンクサービス運営の固定費用 d_{ij}^m , 可変費用 e_{ij}^m , 輸送容量 g_{ij}^m , 所要時間 t_{ij}^m およびモード間の乗継時間 $\tau_n^{mm'}$ を用いる。OD (k, l) 別に線形の需要関数を仮定し, そのパラメータ $q_{kl}^{\max}$, $c_{kl}^{\max}$, β_{kl} を用いる。さらに定数として, 時間価値 v , 十分大きな任意の定数 ω を用いる。

(2) 定式化

OD (k, l) ごとに線形の需要関数と消費者余剰 CS_{kl} を式(1),(2)で与える。

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

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

式(3)の総消費者余剰を目的関数として最大化する。

$$\max_{x, y, Q, C, CS, v} \sum_{k \in K} \sum_{l \in N} CS_{kl} \quad (3)$$

交通量保存則は式(4)～式(7)で与える。

$$Q_{kl} = \sum_{m \in M} \sum_{j \in N} X_{kj}^{klm} \quad \forall k \in K, l \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} X_{in}^{klm} = \sum_{m' \in M} Y_n^{klmm'} \quad (5)$$

$$\forall k \in K, l \in N, n \in N, m \in M$$

$$\sum_{m \in M} Y_n^{klmm'} = \sum_{j \in N} X_{nj}^{klm'} \quad (6)$$

$$\forall k \in K, l \in N, n \in N, m' \in M$$

$$Q_{kl} = \sum_{m \in M} \sum_{i \in N} X_{il}^{klm} \quad \forall k \in K, l \in N \quad (7)$$

リンクサービスに関して式(8), (9)を置く。

$$Z_{ij}^m = Z_{ji}^m \quad \forall i \in N, j \in N, m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} X_{ij}^{klm} \leq g_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (9)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M$$

OD ごとの一般化費用について次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} C_{kl} \cdot Q_{kl} \geq & \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} V_{ij}^{klm} \\ & + v \cdot \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} t_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm} \\ & + v \cdot \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{m' \in M} \tau_n^{mm'} \cdot Y_n^{klmm'} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\forall k \in K, l \in N$$

運賃は非負であり利用者は利用しない区間の運賃を負担する必要はないと仮定して次の 2 式を置く。

$$V_{ij}^{klm} \leq \omega \cdot X_{ij}^{klm} \quad (11)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M, k \in K, l \in K$$

$$V_{ij}^{klm} \geq 0 \quad (12)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M, k \in K, l \in K$$

ネットワーク上でサービスが設定された区間リンクには固定費用が必要となる。これを利用者が支払う運賃のうち固定費用を上回る部分を集約してカバーする。この時の費用負担の範囲として、i) リンクごとにバランスさせる場合, ii) モード別の事業者ごとに内部補助を認め、モード別にバランスさせる場合, iii) リンクを地域やモードを考慮してグループ化し、そのグループごとに事業者に運営を行わせ、事業者内での内部補助を認める場合, iv) ネットワーク全体（国全体）の全ノードでバランスさせる場合の 4 つが考えられる。各々

ースの費用バランスは、それぞれ式(13)～式(16)で表現できる。

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} (V_{ij}^{klm} - e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm}) \geq d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (13)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (V_{ij}^{klm} - e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm}) \geq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad \forall m \in M \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \sum_{(i,j,m) \in L(h)} (V_{ij}^{klm} - e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm}) \geq \sum_{(i,j,m) \in L(h)} d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad \forall h \in H \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \sum_{m \in M} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (V_{ij}^{klm} - e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm}) \geq \sum_{m \in M} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (16)$$

各操作変数の定義域を式(17)の通りに定める。

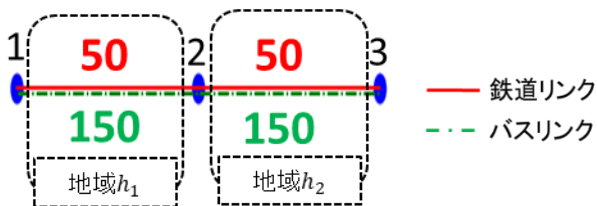
$$\begin{aligned} Z_{ij}^m &\in \{0,1\}, V_{ij}^{klm} \geq 0, \\ X_{ij}^{klm}, Y_n^{klmm'}, Q_{kl}, C_{kl}, CS_{kl} &\geq 0 \\ \forall n, i, j, l &\in N, k \in K, m, m' \in M \end{aligned} \quad (17)$$

本モデルでは式(2)、(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。これらに式変形を施し、0-1変数を含む二次錐計画問題に変換して計算を行う。

3. 費用負担の違いによる総消費者余剰の比較

(1) 仮想ネットワークの設定

図-1のように鉄道、バスを設定可能な2つのリンクからなる仮想ネットワークに対して本モデルを適用する。 $c_{kl}^{\max}$, $q_{kl}^{\max}$ は、3つのODペア(1,2), (2,3), (1,3)それぞれに対して15,000円, 12,400人/day, 18,000円, 2,480人/day, 15,000円, 6,200人/dayとする。モード別の費用パラメータ d_{ij}^m , e_{ij}^m は、鉄道、バスのそれぞれ1リンクあたり、12,000,000円/day, 3,000円/



※図中の値は鉄道リンク、バスリンクの所要時間（分）

図-1 仮想ネットワーク

人, 100,000円/day, 2,000円/人 と設定する。時間価値 v は50円/分とする。

(2) 計算結果

費用負担の4つの範囲に対応する最適ネットワークを求め、ネットワーク構造と消費者余剰の値を比較する。i)リンク別負担(式(13))およびiii)地域別負担(式(15))の場合の最適ネットワーク構造は図-2, ii)モード別負担(式(14))およびiv)全体負担(式(16))の場合の最適ネットワークは図-3のようになった。なお、OD別の最適運賃は、図-2の2ケースでは3つのODペア(1,2), (2,3), (1,3)それぞれに対して4784円/人, 2320円/人, 5129円/人であり、図-3の2ケースではそれぞれ5674円/人, 5674円/人, 7970円/人であった。すなわち前者では需要規模にあわせて2つの地域の負担額は異なるが、後者においては2地域の区間運賃に差が見られない。また、両者とも遠距離運賃は短距離に比べて割安であるが、後者の方が(1,2)の鉄道運賃が高く、遠距離の割引率は若干大きくなっている。



図-2 i)リンク別負担, iii)地域別負担の場合の最適ネットワーク構造と総消費者余剰の値

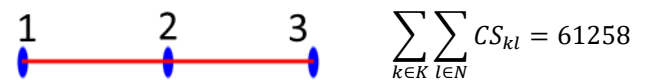


図-3 ii)モード別負担, iv)全体負担の場合の最適ネットワーク構造と総消費者余剰の値

4. おわりに

以上の結果から、費用負担をリンクごとや地域ごとにバランスさせるよりも、異なる地域の区間を含めてバランスさせる方が、鉄道という高度なサービスが提供される区間が増え、総消費者余剰が大きくなることが確認された。

今後はより複雑なネットワークにモデルを適用し、費用負担の違いがもたらす影響の分析を進めたい。

参考文献

- 吉田智貴, 奥村誠, 細正隆: 都市間旅客交通におけるネットワーク構造と費用負担構造の同時最適化, 第60回土木計画学研究発表会・講演集 CD-ROM, 2019