

運賃負担を考慮した都市間旅客交通ネットワーク構造の最適化

Optimal structure of intercity passenger transportation network considering cost sharing by fare

吉田 智貴*

Tomoki YOSHIDA

*地域計画学/被災地支援研究室（指導教員：奥村誠 教授）

交通サービスの提供にはネットワークの整備のための多額の固定費用を要するため、需要規模に応じた効率的な計画を立てることが必要である。また都市間旅客交通においては、リンク毎に速度や基本的な費用が異なるサービスが提供され、各 OD 間の旅客はそれらを適宜組み合わせることで移動を行うため、高速で利便性の高いサービスを設定したリンクに多くの OD ペアの旅客の利用を誘導する一方、逆に旅客数が限られるリンクは費用の小さいサービスに留めたネットワーク構造にする必要がある。本研究では、複数の交通モードを含む最適ネットワーク構造を求めるための消費者余剰を最大化する二次錐計画問題において、ネットワークの固定費用を旅客の運賃によってバランスさせる範囲を複数設定できるモデルを提案した。さらに仮想ネットワークに適用して、費用負担のあり方が最適ネットワークの構造に与える影響の分析を行った。

Key Words: 都市間旅客交通, ネットワーク計画, 運賃, 数理最適化

1. はじめに

交通ネットワークの計画は、需要規模に応じたものであるべきである。ここに都市間旅客交通においては、リンク毎に速度や基本的な費用が異なるサービスが提供される一方、利用者は各 OD 間の旅客によって決まるといった特徴がある。そして、ネットワークの整備にいたっては、インフラの建設・償還などの莫大な固定費用を要する。そのため、固定費用の負担の範囲について議論になる事が少なくない。この問題に対して合理的に答えるためには、新規区間に高度なサービスを導入する際に、旅客の運賃負担の範囲や政府負担の有無に着目することで、需要が安定的な状況や将来的に需要の拡大が見込まれる状況において最適ネットワーク構造を実現できる可能性を検討するべきである。

本研究では、細ら¹⁾が開発したネットワーク最適化モデルに OD 別の戦略的な運賃設定を表す変数を導入するとともに、費用負担の範囲を変化できるように拡張する。これにより、需要規模に応じた最適ネットワーク構造を明らかにするとともに、費用負担の範囲の違いが最適ネットワーク構造に与える影響を考察する。

2. ネットワーク最適化モデルの拡張

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} , OD (k, l) 別のリンク (i, j) でのモード m のサービスに対する運賃負担総額 V_{ij}^{klm} を用いる。パラメータの設定および定式化の詳細は本文を参照のこと。

本モデルでは、OD (k, l) ごとに需要関数を与え、全 OD の消費者余剰の総和を目的関数として最大化する。制約条件として、交通量保存則、リンクサービスの固定費用および可変費用、OD ごとの一般化費用に関する制約を考える。

ネットワーク上でサービスが設定された区間リンクに必要な固定費用を、運賃でカバーする。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、運営する事業者内でバランスさせる場合、iv) ネットワーク全体（国全体）でバランスさせる場合、v) 費用負担の一部 (θ 倍) を政府が別途税金により徴収した財源の中から負担し、残り $(1 - \theta)$ 倍を全利用者の運賃によってカバーするという場合の 5 つを考える。i) ~ iv) の場合に対してそれぞれに応じて、式(13)から(16)を設定する。

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

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

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

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

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

v)の場合に対しては以下の式(17),式(18)を設定し, 目的関数は式(19)のように総消費者余剰から税金負担分を差し引いた社会的総余剰に置き直す.

$$G \geq \theta \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} (V_{ij}^{klm} - e_{ij}^m \cdot X_{ij}^{klm}) \geq (1 - \theta) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (18)$$

$$\max_{x, y, Q, C, CS, V, G} \sum_{k \in K} \sum_{l \in N} CS_{kl} - G \quad (19)$$

求解にあたり, 操作変数どうしの積を含む式を変形し, 0-1 変数を含む二次錐計画問題に変換し計算を行う.

3. 仮想ネットワークにおける分析結果

図-1 は, 支払意思額の最大値 c_{kl}^{\max} は固定した上で, 上限交通量 q_{kl}^{\max} の値を全ての OD ペアについて一様に比例的に変化(α 倍)させ, i)リンクごとにバランスさせる場合に, 需要規模の拡大に応じて現れる最適ネットワーク構造である. 需要規模の拡大に伴い, (A)~(I)のようにバスから在来線特急, 新幹線の順に, 固定費用が高いものの所要時間が短縮できるサービスに置き換わっていくことが分かる.

また, 需要規模が一定であっても, 費用負担のバランス範囲を i)リンクごとから iv)ネットワーク全体に変えると最適ネットワークが(F)から(G)に変化するケースが存在することが分かった. これは, 当該区間を利用した旅客だけではなく, 別の区間において同一のモードを利用した旅客や地域内で別の区間を利用した旅客が運賃として余分に負担することでネットワークを高度化できることを意味している.

さらに, 将来的に需要規模が $0.10 \leq \alpha \leq 0.70$ の範囲で拡大すると想定し, iv)ネットワーク全体で負担する場合と, v)固定費用の半額を政府が負担する場合の最適ネットワークと総消費者余剰, 社会的総余剰を計算した結果は表-1 のようになった. 表-1 より, 政府負担の考慮により最適ネットワークの構造は変わらないが, 総消費者余剰が増加し, 税金負担分を差し引いた社会的総余剰も大きくなる. この結果から, 政府が一部の負担を行うと, 運賃がより自由に設定でき, 社会的総余剰が拡大するケースが存在することが示された.

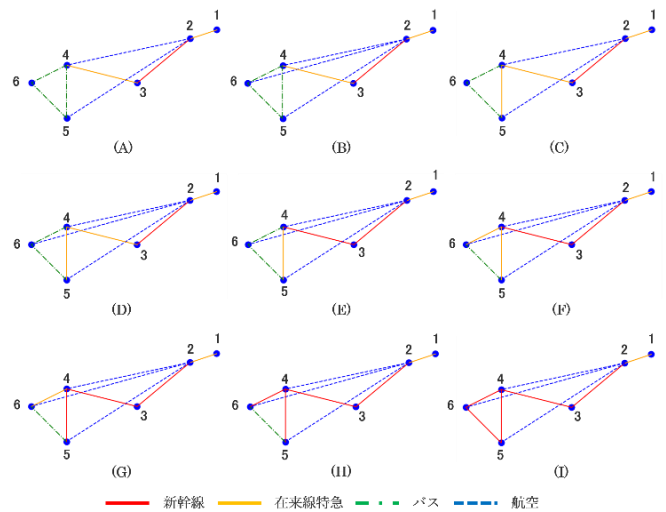


図-1 最適ネットワーク構造

表-1 政府負担の有無による最適ネットワークと総消費者余剰, 社会的総余剰の比較

需要倍率 α	iv)全体負担		v)政府半額負担($\theta = 0.5$)		
	構造	総消費者余剰 (=社会的総余剰)	構造	総消費者余剰	社会的総余剰
0.10	A	2973.2	A	2995.6	2973.3
0.15	B	4483.8	B	4508.2	4483.9
0.20	D	5995.6	D	6022.9	5995.7
0.25	E	7512.2	E	7548.5	7512.3
0.30	E	9029.1	E	9065.5	9029.3
0.35	F	10546.8	F	10586.0	10546.9
0.40	F	12064.7	F	12103.9	12064.8
0.45	F	13582.6	F	13621.8	13582.7
0.50	F	15100.5	F	15139.7	15100.6
0.55	F	16618.4	F	16657.6	16618.5
0.60	F	18136.3	F	18175.4	18136.3
0.65	G	19655.2	G	19703.4	19655.3
0.70	G	21174.5	G	21222.7	21174.6

(百万円/day)

4. おわりに

以上から, 需要規模の拡大に沿う形で利便性の高いモードが導入できることが確認できた. そして, 費用負担をバランスさせる範囲をリンクごとからネットワーク全体に広げると, 鉄道という高度なサービスが提供される区間が増えることが分かった. また, 旅客の運賃負担に加えて, 政府が一部の費用を負担すれば, 税負担上昇を差し引いても, 社会的総余剰の増加につながる事が分かった. 今後はより複雑なネットワークを対象とした分析を進めたい.

参考文献

1)細正隆, 奥村誠: 需要拡大期の都市間旅客交通ネットワーク計画のための最適化モデル, 第 59 回土木計画学研究発表会・講演集 CD-ROM, 2019.

(2020年2月5日提出)