

固定費用負担制度が最適都市間交通ネットワークに及ぼす影響

○ [土] 奥村 誠 [土] 吉田 智貴 (東北大学)

Optimal Structure of Intercity Passenger Transportation Network, Under the Various Fixed Cost Financing Schemes

○ Makoto Okumura, Tomoki Yoshida, (Tohoku University)

It is decided as a condition to start the project of construction of a planned New Shinkansen Line (“Seibi Shinkansen”) that the local government along the line agrees a finance burden, but there is unclear whether only local government “just along a new section” should be considered or not. This study analyzed the difference of optimal structure of intercity passenger transport network, under the various fixed cost financing schemes, such as link-based, mode-based, area-based, and nation-wide. We show the improvement of the Multimodal Network Planning Model in Yoshida et al (2019), and applied to a tiny hypothetical network.

キーワード : 都市間交通, 費用負担, 最適ネットワーク, 運賃政策

Key Words : Intercity Transportation, cost financing, optimal network, pricing policy

1. はじめに

1.1 費用負担の合理的決定の必要性

整備新幹線の事業化に対して、沿線自治体の財政負担が条件となっている。しかし、新規延長区間を持つ地域がその延長に合わせて大きな利益を受けるとは限らないため、「沿線自治体」としてどの範囲を考えるべきなのかは明確ではない。例えば、既開業区間において直通客の利用が見込まれ、来訪者が増える可能性がある場合、そのような根元側の自治体や国が整備費用を一部負担することにより、開業を早めて効果を出現させ得る可能性もある。

本研究は筆者らが開発してきたネットワーク、運賃同時最適化モデルを用いて、運賃による費用負担範囲をリンクごと、モードごと、事業者ごと、ネットワーク全体に変化させることが、最適ネットワーク構造に与える影響を分析する。

1.2 関連する先行研究

都市間交通のネットワークと運賃の同時最適化の研究は、極めて単純な構造のネットワークを対象とした理論的分析が目指され¹⁾、多数の都市間のOD交通が存在するネットワークでは、運賃構造を所与とした上で遺伝的アルゴリズム(GA)などのヒューリスティクス手法を用いた擬似最適化にとどまっていた²⁾。

Okumura et al.³⁾は、複数モード間の乗継経路を内生的に発生させ、複数ODの一般化費用の総和を最小化するようなネットワークの構造を計算する混合整数計画モデルを提案した。細・奥村⁴⁾は、OD間の一般化費用の変化による需要喚起効果を考慮するため、線形需要関数のもとで消費者余剰を最大化する2次計画問題を提案した。吉田・奥村・細⁵⁾では、ネットワークと運賃負担構造の同時最適化を意図し、ODごとに差別化したリンク運賃を変数に加えたモデルを提案した。しかし両端のノードを用いてODペアやリンクを定義したため変数の数が増え、極めて小規模な仮想ネットワークにしか適用できないという問題があった。

本研究は、この吉田・奥村・細⁵⁾によるネットワーク、運賃同時最適化モデルにおいて、ODペアやリンクの定義を見直して変数を抑え、規模の大きなネットワークへの適用を可能とした。また、運賃による費用負担の範囲を複数設定できるようにした。なお、本モデルは0-1変数を含む凸二次錐計画問題となっており、商用の最適化ツールを用いて容易に最適解を得ることが出来る。

ここでは、13の地上リンク(バス、鉄道)と17の航空リンクにより接続可能な8都市の仮想的なネットワークに、本モデルを適用した結果を示す。

2. ネットワーク・運賃同時最適化モデル

2.1 モデルの基本構成

本研究ではOD間の需要が弾力的であると仮定し線形の需要関数を仮定する。モード間の乗り継ぎを明示的に考慮するため、各都市ノードをモード別の着ノードと発ノードに区分し、その間に乗継時間を要する乗継リンクを考える。個々の利用者は完全な情報を持ち最小費用の経路のみを選択すると仮定する。一つの最小費用経路の輸送容量が満杯になると次に一般化費用の小さい経路を用いることになるが、この場合OD毎の平均運賃水準を保ちつつ、使われる全ての経路の一般化費用が等しくなるように、経路別の運賃が調整されると仮定する。

リンクにおける交通サービスを提供する事業者にはゼロ利潤を仮定する。すなわち、事業者はリンクを通過するOD旅客からの運賃をリンク別に配分した収入と、政府からの補助金を加えた収入を得る。これを、建設費の償還と路線維持のためのリンク運営費用に充てるが、交通量に関係しない固定費用と、旅客数に比例する可変費用からなる。

旅客に賦課するリンクごとの運賃を、そのリンクの平均運営費用と等しく設定すれば、固定費用はちょうどリンクごとの運賃収入で賄われることになる。しかし、モードごとに事業者が存在する場合や、複数の地域ごとに異なる事業者が存在する場合には、各事業者が運営する複数のリンクで得られる運賃収入全体で、全リンクの運営費用全体を賄うというプール制も導入できる。つまり、収益性の高いリンクからの収入を他のリンクの運営に回す内部補助を許すことが可能である。さらに、ネットワーク全体でバランスさせるケースも考えられる。

いずれのケースにおいても、政府が固定費用の一部分を補助金によって支援する可能性を考える。この政府の補助金は租税として、利用者の所得を減らして調達する。

本モデルでは、社会的に見て最も効率的な交通サービスの実現をめざす。そのため、利用者の利便性を意味する総消費者余剰を考え、そこから政府が支出する補助金総額を差し引いた社会的余剰を目的関数として最大化する。

なお後述するように、本研究では固定費用が小さい順にバス、航空、鉄道の3モードを考え、旅客あたりの可変費用に時間費用を加えたものはこの順で大きいと仮定する。そのため、リンク容量が小さいバスや航空の総費用は、容量制約に達する前に鉄道の総費用を上回り、その時点でリンクサービスが鉄道に切り替わって、バスや航空機の利用者は存在しなくなる。結果として、一般化費用の異なる複数の経路が現れるとすれば、それは同一のモード上の経路に限られるため、経路間の運賃調整は単一のモード内でのみ考えれば十分である。

2.2 モデルの定式化

本モデルにおける集合・変数・パラメータとその意味は表-1の通りである。定式化は以下に挙げる通りであるが、紙面の都合上説明は省略する。

表-1 変数・パラメータとその意味

変数	意味
K	ODペアの集合
$P(k)$	ODペア k の経路上通過ノードの集合
L	(モード別) 有向リンクの集合
L^+	有向リンク集合の1方向のみの部分集合
$r(l)$	リンク l の逆方向のリンク
$A(n)$	ノード n を出発するリンクの集合
$B(n)$	ノード n に到着するリンクの集合
$mn(n)$	ノード n のモード番号
$Al(k)$	ODペア k のいずれかの利用経路で、出発後最初に利用するリンクの集合
$Bl(k)$	ODペア k のいずれかの利用経路で、到着前最後に利用するリンクの集合
M	モードの集合
$Mn(n)$	ノード n において利用可能なモードの集合
$Lm(m)$	モード m のサービスを行うリンクの集合
H	事業者の集合
$Lh(h)$	事業者 h が運営するリンクの集合
Z_l	リンク l のサービス有無を示す $\{0,1\}$ 変数
X_l^k	リンク l を利用するODペア k の交通量
V_l^k	リンク l を利用するODペア k の運賃負担総額
$Y_{mm'}^{kn}$	ノード n において、モード m から m' に乗り継ぐODペア k の乗継交通量
Q_k	ODペア k の交通量
C_k	ODペア k の一般化費用の平均値
CS_k	ODペア k の消費者余剰総額
G	固定費用を賄う上での政府の負担総額
QQ_k	$QQ_k \geq (Q_k)^2$ として定義する操作変数
d_l	リンク l を運営するための固定費用
e_l	リンク l を運営するためのリンクの利用者数に比例する可変費用
g_l	リンク l の輸送容量
t_l	リンク l の所要時間
$\tau_{mm'}^n$	ノード n において、モード m から m' に乗り継ぐのに必要な乗継時間
$q_k^{\max}$	ODペア k の上限交通量
$c_k^{\max}$	ODペア k の旅客の支払意思額の最大値
β_k	ODペア k の逆需要関数の傾き
v	時間価値
ω	十分大きな任意の定数
θ	固定費用の政府負担率

(1) 線形需要関数の設定

$$C_k = c_k^{\max} - \beta_k \cdot Q_k \quad \forall k \in K \quad (1)$$

$$CS_k = \frac{1}{2} (c_k^{\max} - C_k) \cdot Q_k \quad \forall k \in K \quad (2)$$

(2) 交通量保存則と非連続経路の防止制約

$$Q_k = \sum_{l \in Al(k)} X_l^k \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{l \in B(n)} X_l^k = \sum_{m' \in Mn(n)} Y_{mn(n) m'}^{kn} \quad (4)$$

$$\sum_{m \in Mn(n)} Y_{mmn(n)}^{kn} = \sum_{l \in A(n)} X_l^k \quad \forall n \in P(k), \forall k \in K \quad (5)$$

$$Q_k = \sum_{l \in Bl(k)} X_l^k \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$0 \geq \sum_{l \in al(k)} X_{rl(l)}^k \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$0 \geq \sum_{l \in bl(k)} X_{rl(l)}^k \quad \forall k \in K \quad (8)$$

(3) リンクサービスの提供条件

$$Z_l = Z_{r(l)} \quad \forall l \in L^+ \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} X_l^k \leq g_l \cdot Z_l \quad \forall l \in L \quad (10)$$

(4) OD ごと的一般化費用に関する制約

$$C_k \cdot Q_k \geq \sum_{l \in L} V_l^k + v \cdot \sum_{l \in L} t_l \cdot X_l^k + v \cdot \sum_{n \in p(k)} \sum_{m \in Mn(n)} \sum_{m' \in Mn(n)} \tau_{mm'}^n \cdot Y_{mm'}^{kn} \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$V_l^k \leq \omega \cdot X_l^k \quad \forall k \in K, l \in L \quad (12)$$

$$V_l^k \geq 0 \quad \forall k \in K, l \in L \quad (13)$$

(5) 4 種類の費用負担スキームの表現

$$\sum_{k \in K} (V_l^k - e_l \cdot X_l^k) \geq (1 - \theta) d_l \cdot Z_l \quad \forall l \in L \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in Lm(m)} (V_l^k - e_l \cdot X_l^k) \geq (1 - \theta) \sum_{l \in Lm(m)} d_l \cdot Z_l \quad \forall m \in M \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in Lh(h)} (V_l^k - e_l \cdot X_l^k) \geq (1 - \theta) \sum_{l \in Lh(h)} d_l \cdot Z_l \quad \forall h \in H \quad (16)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} (V_l^k - e_l \cdot X_l^k) \geq (1 - \theta) \sum_{l \in L} d_l \cdot Z_l \quad (17)$$

(6) 政府の財政制約と目的関数

$$G \geq \theta \sum_{l \in L} d_l \cdot Z_l \quad (18)$$

$$\max_{x, y, Z, Q, C, CS, V} \sum_{k \in K} CS_k - G \quad (19)$$

(7) 非負制約

$$\begin{aligned} Z_l &\in \{0, 1\}, \forall l \in L \\ X_l^k, V_l^k &\geq 0, \forall l \in L, \forall k \in K \\ Q_k, C_k, CS_k &\geq 0, \forall k \in K \\ G &\geq 0, \\ Y_{mm'}^{kn} &\geq 0, \forall m, m' \in Mn(n), \forall n \in p(k), \forall k \in K \end{aligned} \quad (20)$$

2.3 二次錐制約問題への変換と計算

以上の式(2), (11)に含まれる非線形項を変形し, 新たな変数 Q_k を定義して次の凸二次制約のみを含む形に変換し

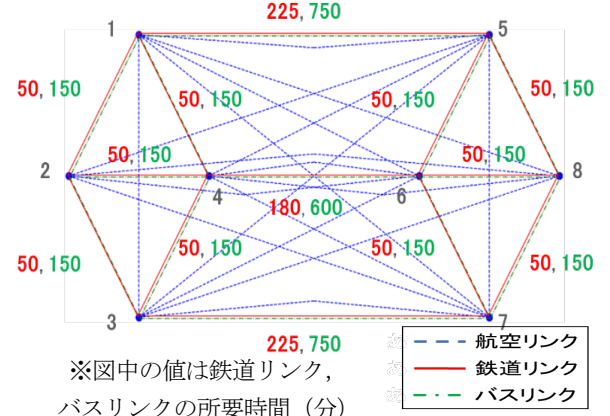


図-1 仮想ネットワーク

表-2 航空リンクの所要時間

リンク	所要時間 (分)	リンク	所要時間 (分)
1 3	100	3 5	155
1 5	150	3 6	145
1 6	145	3 7	150
1 7	155	3 8	160
1 8	160	4 5	145
2 5	160	4 6	135
2 6	150	4 7	145
2 7	160	4 8	150
2 8	165	5 7	100

表-3 各モードの固定費用, 可変費用, 輸送容量

モード	固定費用 (円 / day)	可変費用 (円/人)	輸送容量 (人 / day)
航空	1,500,000	12,000	15,000
鉄道	12,000,000	3,000	15,000
バス	100,000	2,000	15,000

表-4 モード間の乗継時間 (分)

	航空	鉄道	バス
航空	30	60	60
鉄道	60	0	15
バス	60	15	0

て, 凸二次錐計画問題を得る. これは, 商用最適化ソルバ—Gurobi Optimizer 8.1 を用いて求解が可能である.

3. 仮想ネットワークでの分析

3.1 仮想ネットワークとパラメータの設定

図-1の仮想ネットワークを考える. 鉄道リンクとバスリンクの所要時間 (分) は図中に示す通りで, 航空の所要時間は表-2の通りとする. モードごとの固定費用, 可変費用, 輸送容量を表-3のように与える. 輸送容量は十分に大きな値とし, 混雑は発生しないものとする. モード間の乗継時間 $\tau_{nm}^{mm'}$ を場所によらず, 表-4のように与える. 上限交通量 $q_{kl}^{\max}$ と支払意思額の最大値 $c_{kl}^{\max}$ をそれぞれ表-5, 表-6のように与え, 旅客の時間価値 v は 50 (円/分) と置く.

表-5 上限交通量 (人/day)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	合計
1	0	7,680	3,840	7,680	1,536	1,536	1,280	1,280	24,832
2	7,680	0	7,680	7,680	1,280	1,536	1,280	1,280	28,416
3	3,840	7,680	0	7,680	1,280	1,536	1,536	1,280	24,832
4	7,680	7,680	7,680	0	1,536	1,920	1,536	1,536	29,568
5	1,536	1,280	1,280	1,536	0	7,680	3,840	7,680	24,832
6	1,536	1,536	1,536	1,920	7,680	0	7,680	7,680	29,568
7	1,280	1,280	1,536	1,536	3,840	7,680	0	7,680	24,832
8	1,280	1,280	1,280	1,536	7,680	7,680	7,680	0	28,416
合計	24,832	28,416	24,832	29,568	24,832	29,568	24,832	28,416	215,296

表-6 支払意思額の最大値 (円/day)

OD	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	15,000	30,000	15,000	75,000	75,000	90,000	90,000
2	15,000	0	15,000	15,000	90,000	75,000	90,000	90,000
3	30,000	15,000	0	15,000	90,000	75,000	75,000	90,000
4	15,000	15,000	15,000	0	75,000	60,000	75,000	75,000
5	75,000	90,000	90,000	75,000	0	15,000	30,000	15,000
6	75,000	75,000	75,000	60,000	15,000	0	15,000	15,000
7	90,000	90,000	75,000	75,000	30,000	15,000	0	15,000
8	90,000	90,000	90,000	75,000	15,000	15,000	15,000	0

3.2 最適ネットワーク

異なる需要規模に対する最適ネットワーク形状を計算するため、上限交通量 $q_{kl}^{\max}$ の値を全 OD ペア一様に α 倍 ($\alpha = 0.05, 0.10, \dots, 0.95, 1.00$) した。また固定費用の政府分担率 θ の値を 3 水準 ($\theta = 0.0, 0.50, 1.00$) 設定した。

最適ネットワークの計算結果を表-7 に集約している。各セルの 3 つの数値は、航空、鉄道、バスのリンク数を表す。これより、需要規模が 0.5 以下では飛行機とバスによる構造となり、その後鉄道が現れる。鉄道の普及によりバスリンクは消失していくが、航空は長距離 OD に対して残る。政府の補助率が大きくなると、需要規模がより大きい時に現れる構造が早めに実現する。

費用分担スキームによる影響はあまり大きくないが、東西各地域内のバスと鉄道を同事業者が運行する scheme3 において、リンク別 (scheme1) モード別 (scheme2) よりも多くの路線でバスが維持できるケースが複数みられる。全域 (scheme4) の費用負担がバスから鉄道への移行を可能にするケースも存在している。

参 考 文 献

- 1) Takebayashi, M.: How could the collaboration between airport and high speed rail affect the market? , *Transportation Research Part A*, 92, pp.277-286, 2016.
- 2) 波床正敏, 中川大: 整備スキーム改善による幹線鉄道網における地域間交流活性化に関する定量的研究, 土木学会

表-7 需要規模, 政府分担率, スキームに対する最適構造

Demand Size α	Governmental Ratio $\theta=0$				Governmental Ratio $\theta=0.5$				$\theta=1.0$ All Schemes
	Scheme1	Scheme2	Scheme3	Scheme4	Scheme1	Scheme2	Scheme3	Scheme4	
0.05	3-0-13	3-0-13	3-0-13	3-0-13	3-0-13	3-0-13	3-0-13	3-0-13	3-0-13
0.1	8-0-11	8-0-11	9-0-11	8-0-11	8-0-11	8-0-11	8-0-11	8-0-11	8-0-11
0.15	8-0-11	8-0-11	10-0-11	8-0-11	13-0-11	13-0-11	14-0-11	13-0-11	13-0-11
0.2	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11
0.25	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11
0.3	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11
0.35	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11
0.4	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11
0.45	15-0-11	15-0-11	15-0-11	15-0-11	7-5-6	7-5-6	7-5-6	7-5-6	7-5-6
0.5	7-5-6	7-5-6	7-5-6	7-5-6	10-5-6	10-5-6	10-5-6	10-5-6	11-5-6
0.55	8-5-6	10-5-6	10-5-6	10-5-6	11-5-6	11-5-6	11-5-6	11-5-6	11-5-6
0.6	11-5-6	11-5-6	11-5-6	11-5-6	11-5-6	11-5-6	11-5-6	11-5-6	9-7-4
0.65	10-6-5	10-6-5	11-5-6	11-5-6	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4
0.7	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4
0.75	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4
0.8	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0
0.85	9-7-4	9-7-4	9-7-4	9-8-3	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0
0.9	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0
0.95	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0
1	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0	9-11-0

論文集 D3, 71(5), pp.I_725-I_736, 2015.

- 3) 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 (ITLGB2012)*, pp. 309-314, 2012.
- 4) 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, 74 (5) , pp.I_779-I_786, 2018.
- 5) 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.