

来訪外国人旅行者を考慮した都市間旅客交通ネットワーク

Intercity Passenger Transportation Network Considering Inbound Tourists

元木 智*

Satoshi MOTOKI

*地域計画学・レジリエンス計画研究室（指導教員：奥村 誠 教授）

Air transport and high-speed rail, which provide intercity passenger transport in the country, each have different characteristics. Considering sustainability from economic, social, and environmental perspectives, it is necessary to design an optimal intercity passenger transportation network for the whole country by combining these modes appropriately. To clarify how inbound tourists should be accommodated and how the intercity passenger transport network should be designed to meet the demand of both domestic travelers and inbound tourists under rapidly growing inbound demand, this study extends a demand- and fare-endogenous network optimization model developed in prior research to incorporate inbound tourists' entry, exit and domestic travel, and conducts numerical analyses. The results indicate that, when airport capacity is limited or when a substantial increase in inbound tourists is anticipated, it is necessary to disperse gateway functions and strengthen high-speed rail functions (faster transportation and increased frequencies) simultaneously to maintain the convenience of the tourists.

Key Words: intercity transportation, multi-modal, optimal network, inbound tourists, gateway airport

1. はじめに

国内の都市間旅客交通を担う航空や高速鉄道は、互いに異なる特徴を有する。航空は、中長距離帯の都市間を直行かつ高速で結ぶことができるほか、路線を設定するにあたって必要な固定費用が比較的小さい。新幹線や在来線特急といった高速鉄道は、固定費用が莫大である一方、旅客 1 人当たりの運行費用や二酸化炭素排出量は小さい。また、複数都市を経由してリンクを結ぶことから、多様な地域間の旅行需要を集約して輸送することが可能である。さらに、新たな高速鉄道モードとして現在開発・建設が進行中である超電導リニアは、航空と高速鉄道の中間的な特徴を持つ。このように各輸送モードはそれぞれ異なる特徴を持ち合わせており、経済・社会・環境の各側面から持続可能性を考慮しつつ、適切に組み合わせることによって、国土全体で最適な都市間旅客交通ネットワークを構築する必要がある。

このとき、新たな高速鉄道モードの導入や国内における人口減少等を考慮すると、都市間旅客交通を担う各モードの役割は、将来的に大きく変化するものと考えられる。したがって、各モードが担う役割や組み合わせ方としてあるべき姿を、今一度国土全体として一体的に捉え直す必要がある。

さらに、今後の都市間旅客交通ネットワークについて検討する際に特に考慮すべき要素の一つとして、訪日外国人旅行者数の顕著な増加が挙げられる。訪日外国人旅行者数の増加は近年著しく進行しており、今後もさらなる増加が見込まれることから、訪日外国人旅行者の受け入れ体制の強化が求められる。また、国内各ゲートウェイ空港の発着容量の逼迫についても現在大きな問題となっている。この状況下において、外国人旅行者の増加にあわせて航空便を比例的に拡大した場合、空港容量の

逼迫がさらに深刻化することが懸念される。さらに国内の人口減少が重なると、国内の主要都市と地方都市とを結ぶ航空便は運航を継続できない可能性がある。

以上を踏まえると、今後さらなる増加が見込まれる来訪外国人旅行者をどのように受け入れ、国内旅行者と外国人旅行者の双方にとって利便性が高い国内都市間旅客交通ネットワークをいかに構築していくかを抜本的に検討する必要がある。

本研究では、需要・運賃内生型ネットワーク最適化モデルを、来訪外国人の入出国や国内移動を考慮した形に拡張し、日本国内および周辺のネットワークにおいて計算を行う。また、各ノードにおける航空発着便数制約や訪日外国人旅行者数の大幅な増加等の複数のシナリオを設定し、国内におけるネットワーク構造や来訪外国人の海外からの受け入れ方、旅行者の利便性や費用負担構造がどのように変化し得るかを分析する。

2. 本研究のアプローチ

(1) 既往研究

航空と高速鉄道の連携や競合に関する研究は多数存在する。例えば、Takebayashi¹⁾は、空港のゲートウェイ機能を向上させるための空港と高速鉄道との連携可能性について論じており、高速鉄道と需要規模の小さい空港との連携が、需要規模の大きい空港の混雑緩和や社会厚生

の改善に寄与することを示した。一方で、来訪外国人旅行者の存在を明確に区別し、航空や高速鉄道の旅客輸送の分担方法のあり方や、最適なネットワーク設計について分析を行おうとする研究は少ない。また、これらの既往研究の多くは数ノードからなるネットワークを分析対象としており、同一リンクを複数の OD の旅客が共有して利用することによる効果が

十分に考慮されているとはいえない。

(2) ネットワーク最適化モデルの利用

現状の役割や枠組みを大きく超えて変化し得る国内都市間旅客交通ネットワークのあり方を考えるうえで、最適化モデルによる計算は有効な手段の一つである。

都市間旅客交通ネットワークの最適化モデルとして、Okumura et al.²⁾は固定需要に対し、複数モード間の乗継を考慮し総一般化費用とネットワークの運営費用の和を最小化する Multi-modal Network Planning (MNP) モデルを提案した。MNP モデルは混合整数計画問題として定式化され、既存のパッケージを用いて容易に分析可能である。以降、複数の拡張モデルが提案されている。細・奥村³⁾は、OD 間の所要時間短縮が需要を喚起する可能性を考慮し、これを需要内生型に拡張した。各 OD ペア間で線形の需要関数を仮定し消費者余剰を最大化する二次計画問題を定式化し、凸二次錐計画問題に変換して計算する方法を提案した。さらに吉田・奥村⁴⁾は、ネットワークの固定費用や運行費用を運賃によって賄うという制約を加え、運賃を内生化した。これにより、集客が難しいサービスが設定されず、外部からの財政支援に頼らない運営が可能な経済的持続可能性があるネットワークを計算できる。

最適化モデルを用いたこれらの研究は、国土レベルの広範囲のネットワークを対象として効率的な都市間旅客交通の運用方法を分析することができるほか、OD 単位で旅行を行う旅客がリンク単位で供給される交通モードを乗り継いで目的地に向かうという実際の構造を明示的に表現するモデルとなっている。

(3) 分析方針

本研究では、ネットワーク構造が利便性を通して OD 需要を変化させることや、経済的な持続可能性の基礎となる運賃負担条件を考慮できる、吉田・奥村⁴⁾で提案された需要・運賃内生型の MNP モデルを基本とし、来訪外国人旅行者の入出国と移動を考慮した目的関数式や制約、計算に必要な操作変数やパラメータを導入する。

本研究では図-1に示すように、日本国内を想定した 14 ノード、海外を想定した 3 ノードの計 17 ノードを設定し分析を行う。

また、将来の標準的な交通量として、外客は現状の交通量の 2 倍を与えている。

本モデルにおいては、制約式を追加したりパラメータ値や設定可能リンクを調整することで、様々なシナリオを表現することができる。本研究では将来における標準的なパラメータ値を設定した基本ケースにおける計算結果と、複数のシナリオを設定した際の計算結果を比較することで、条件の変化によるネットワーク構造や外国人旅行者の受け入れ方の違いについて分析する。

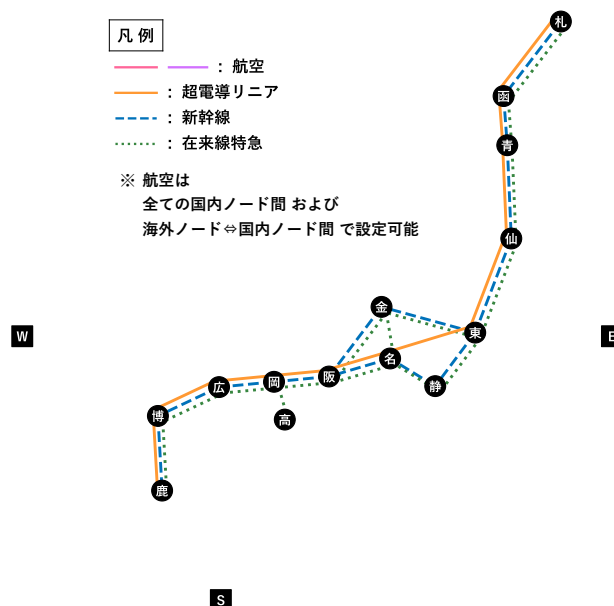


図-1 日本周辺を模したネットワーク

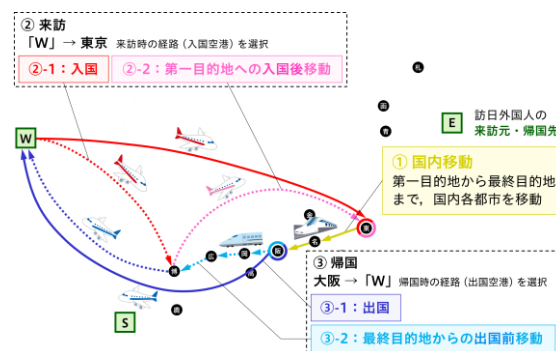


図-2 本研究における来訪外国人の表現方法

3. ネットワーク最適化モデル

(1) 来訪外国人旅行者の表現方法

本研究における来訪外国人旅行者の考え方を図-2に示す。この外国人旅行者は、国内の都市間旅客交通モードを利用し、第一目的地である「東京」から、途中「名古屋」を経由し、最終目的地である「大阪」まで国内を移動することが決定している（図中黄色実線）。来日時には、まずどのノードに入国するかが選択される。このとき、第一目的地に直接入国しない場合（図中赤色点線）、国内の都市間旅客交通モードを利用し、第一目的地まで移動する（図中桃色点線）。帰国時も同様に、どのノードから出国するか選択されるが、もし最終目的地から出国しない場合は（図中青色点線）、出国するノードへの移動が必要となる（図中水色点線）。

以降、国内を移動する日本人旅行者を「内容」と表記する。また、国内において第一目的地から最終目的地まで移動する外国人旅行者を「外客（国内移動）」、海外から入国し国内第一目的地に向かう外国人旅行者を「外客（来訪）」、国内最終目的地から海外へ出国する外国人旅行者を「外客（帰国）」とそれぞれ表記する。

(2) モデルの基本的な考え方

本モデルにおける主要な変数間の相互関係を図-3に示す。各リンクにおいて設定可能なモードから実際に設定するものを選び、旅客数をちょうど運び切るだけの運行本数を設定する。各OD間の旅客は設定されたリンク上のモードを順次乗り継いでOD間を移動し、自らが利用するリンクの運賃と所要時間費用、乗継時間費用の和である一般化費用を負担する。旅客が支払った運賃の総額によって、リンクを設定するための固定費用と運行する便数に比例する可変費用が賄われ、事業者の利潤は発生しないものとする。

本モデルでは、**内容と外客（国内移動）**については、支払った運賃と時間費用の和である一般化費用の値に対応して需要量が変動するものと考え、OD別に線形の逆需要関数を与え、消費者余剰を求める。**外客（来訪）および外客（帰国）**については、それぞれのODにおいて旅客が負担する一般化費用の大小による需要の変動はないものと仮定し、需要を固定として与える。これらの旅客については、OD別に一般化費用に対する最大支払意思額を設定し、その最大支払意思額から一般化費用を差し引いた値に、当該ODの交通量を乗じたものを消費者余剰とする。それぞれにおいて算出したOD別の消費者余剰を全旅行者・全ODペアについて足し合わせた総消費者余剰を最大化する。

(3) 定式化

操作変数は表-1、パラメータは表-2、目的関数や各種制約式、および各操作変数の定義域は表-3に示すように定める。

以上のモデルは、式(3)と(15)において操作変数同士の積を含んでいるため、これらに式変形を施し、0-1変数を含む凸二次錐計画問題に変換したうえで、商用最適化ソルバーを用いて数値的に解を求める。実際の計算ではGurobi Optimizerを用いる。

4. 最適ネットワークと外客の受け入れ方

はじめに、基本ケースにおいて導出した最適ネットワーク構造と各旅行者の総消費者余剰を図-4に示す。なお、リンク上の数値は各リンクにおける片道当たりの便数である。航空のうち、国際線は東京および大阪でその大多数を受け持つ。国内線は東京や大阪といった主要都市と北海道や青森、九州といった列島末端とを結ぶ便が

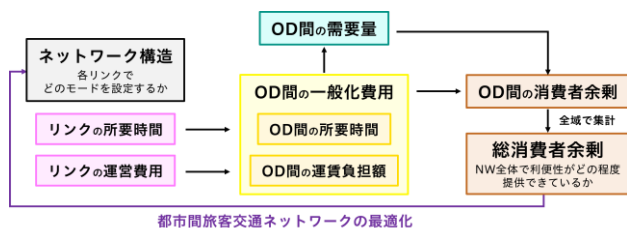


図-3 主要な変数間の相互関係

多く設定される。鉄道モードは、札幌から博多まで国土を縦貫するように設定され、東京から大阪までの区間では最速達の超電導リニアが設定される。

表-1 操作変数

Q_{kl}^p	OD交通量	C_{kl}^p	OD間一般化費用	CS_{kl}^p	OD別消費者余剰
$Y_n^{pkmm'}$	乗継交通量	B_k^{pm}	発生交通量	A_l^{pkm}	集中交通量
Z_{ij}^m	リンクの設定の有無を表す0-1変数	F_{ij}^m	運行本数	X_{ij}^{pkm}	リンク交通量
V_{ij}^{pkm}	費用負担総額				

表-2 パラメータ

$q_{kl,max}^p$	OD間上限交通量	β_{kl}^p	逆需要関数の傾き	$C_{kl,max}^p$	OD間一般化費用最大支払意思額
\bar{q}_{kl}^p	OD間固定需要	d_{ij}^m	固定費用	e_{ij}^m	運行費用
g_{ij}^m	最小運行本数	h_{ij}^m	最大運行本数	s_{ij}^m	座席数
t_{ij}^m	所要時間	$\tau_n^{mm'}$	乗継時間	γ	十分大きな任意の定数
v	時間価値				

表-3 ネットワーク最適化モデルの定式化

$\max \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{l \in N} CS_{kl}^p$		(1)
$C_{kl}^p = c_{kl,max}^p - \beta_{kl}^p \cdot Q_{kl}^p \quad \forall k, l, p \in \{0,1\}$	(2)	$CS_{kl}^p = \frac{1}{2} (c_{kl,max}^p - C_{kl}^p) Q_{kl}^p \quad \forall k, l, p \in \{0,1\}$
$Q_{kl}^p = \bar{q}_{kl}^p \quad \forall k, l, p \in \{2,3\}$	(4)	$CS_{kl}^p = (c_{kl,max}^p - C_{kl}^p) Q_{kl}^p \quad \forall k, l, p \in \{2,3\}$
$\sum_{i \in N} X_{in}^{pkm} = A_n^{pkm} + \sum_{m' \in M} Y_n^{pkmm'} \quad \forall k, n, m, p$	(6)	$\sum_{m \in M} A_n^{pkm} = Q_{kn}^p \quad \forall k, n, p$
$B_n^{pm} + \sum_{m' \in M} Y_n^{pkmm'} = \sum_{j \in N} X_{nj}^{pkm} \quad \forall k, n, m, p$	(8)	$\sum_{l \in N} Q_{nl}^p = \sum_{m \in M} B_n^{pm} \quad \forall n, p$
$F_{ij}^m = F_{ji}^m \quad \forall m, i, j$	(10)	$g_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \leq F_{ij}^m \leq h_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad \forall m, i, j$
$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} X_{ij}^{pkm} \leq s_{ij}^m \cdot F_{ij}^m \quad \forall m, i, j$	(12)	$V_{ij}^{pkm} \leq \gamma \cdot X_{ij}^{pkm} \quad \forall k, m, i, j, p$
$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} V_{ij}^{pkm} \geq d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m + e_{ij}^m \cdot F_{ij}^m \quad \forall m, i, j$	(14)	$\begin{aligned} &Z_{ij}^m \in \{0,1\}, Q_{kl}^p, C_{kl}^p, CS_{kl}^p, Y_n^{pkmm'}, \\ &B_n^{pm}, A_l^{pkm}, Z_{ij}^m, F_{ij}^m, X_{ij}^{pkm}, V_{ij}^{pkm} \geq 0 \\ &\forall n, i, j, l \in N, \forall k \in K, \forall m, m' \in M, \forall p \in P \end{aligned}$
$\sum_{l \in N} C_{kl}^p \cdot Q_{kl}^p \geq \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{j \in N} V_{ij}^{pkm} + v \cdot \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{m' \in M} \tau_n^{mm'} \cdot Y_n^{pkmm'} \quad \forall k, p$		(15)

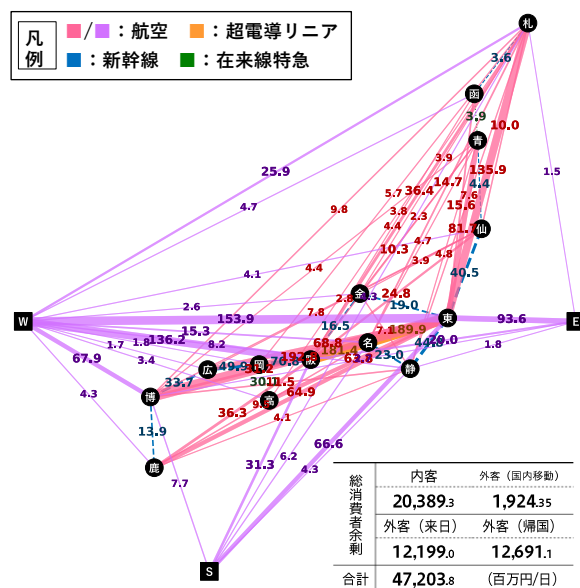


図-4 基本ケースにおける最適ネットワーク構造

5. 様々なシナリオ下における計算

(1) 航空発着便数の制約の考慮

次に、空港容量の制約として、それぞれのノードにおいて 800 便/日 (400 往復/日) のみ航空便が発着可能であるとする制約を付加して計算を行う。

導出した最適ネットワーク構造と各旅行者の総消費者余剰を図-5 に示す。航空のうち、東京を発着する国内線は、札幌を結ぶ便を除いて設定されなくなる。代わって、東京に隣接する仙台や静岡で国内線の発着便数が増加するほか、列島を縦貫する高速鉄道の便数が大幅に増加し、函館ー青森間や仙台ー東京間のように、より高速な鉄道モードに切り替えて需要に対応するリンクもある。

(2) 外客の大幅な増加

来訪外国人旅行者数がさらに増加することを考慮し、各ノードにおける航空発着便数上限 800 便/日 (400 往復/日) の制約に加えて、基本ケースで現状の 2 倍として設定していた外客の標準的な交通量を、現状の 3 倍として計算を行った。

導出した最適ネットワーク構造と各旅行者の総消費者余剰を図-6 に示す。航空のうち、国内線は東京を発着していた便がさらに仙台や静岡に振り分けられるほか、国際線についても、東京で受け入れきれない便を名古屋や大阪といったノードで受け入れる。鉄道を利用して移動する OD が増加するため、仙台ー大阪間では最速達の超電導リニアが設定されるほか、便数を増加して対応する。

以上より、空港容量制約下および外客の大幅な増加が見込まれる場合において、旅行者の利便性を維持するためにはゲートウェイ機能の分散と高速鉄道の機能強化 (より高速な超電導リニアの導入や増便) を同時に実施することが有効であることが示された。

6. おわりに

本研究では、国内旅行者および今後さらなる増加が見込まれている外国人旅行者の双方の需要を満たし得る来訪外国人の受け入れ方や国内都市間旅客交通ネットワークのあり方を分析するため、先行研究にて開発された需要・運賃内生型ネットワーク最適化モデルを来訪外国人の入出国および国内移動を明示的に扱える形に拡張し、複数のシナリオ下において計算を行った。

結果として、空港容量制約下および外客の大幅な増加が見込まれる場合には、ゲートウェイ機能の分散と高速鉄道の機能強化を同時に行うことにより、利用者の利便性を維持し得るネットワークを構成することが有効であることを確認した。

より実務的な計画を検討する上では、各モード・ノードにおいて設定しているパラメータ値について、より精度の高い実測値や将来想定に基づく設定が必要である。

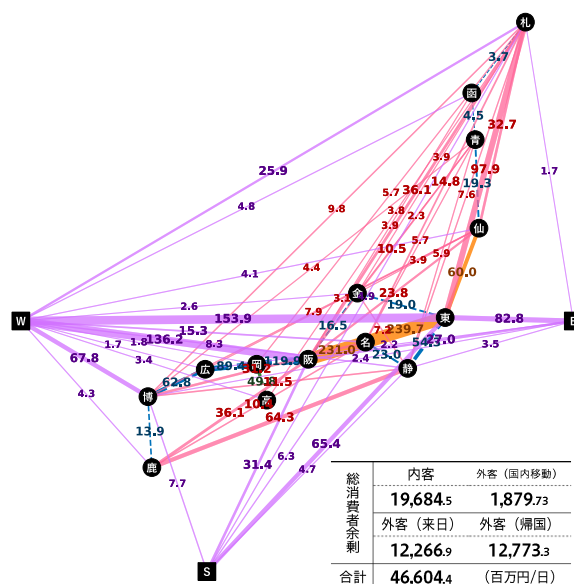


図-5 ノード当たり航空発着便数上限 800 便/日とした際の最適ネットワーク構造

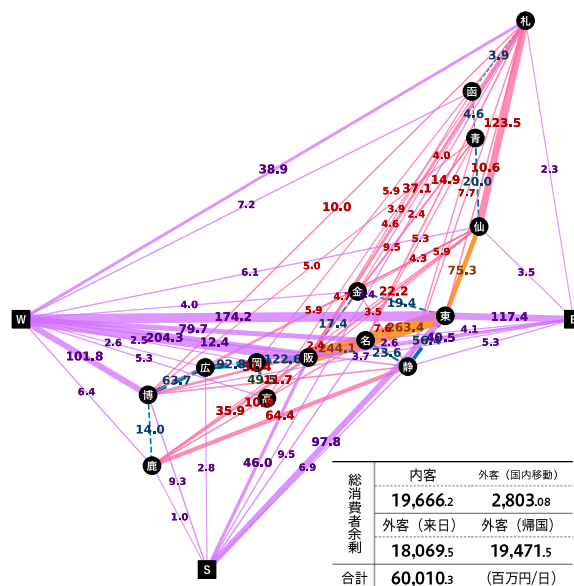


図-6 外客3倍かつノード当たり航空発着便数上限 800 便/日とした際の最適ネットワーク構造

参考文献

- 1) Takebayashi, M.: How could the collaboration between airport and high speed rail affect the market?, Transportation Research Part A, Vol.92, pp.277-286, 2016.
- 2) 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.
- 3) 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_779-786, 2018.
- 4) 吉田智貴, 奥村誠: 費用負担スキームを考慮した都市間旅客交通ネットワークの最適構造, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.76, No.5, pp.I_977-I_986, 2021.

(2026 年 1 月 28 日提出)