

# 旅行需要の季節変動データに基づく最適なマルチモード都市間交通ネットワークの研究

藤田 雄介<sup>1</sup>・山口 裕通<sup>2</sup>・中山 晶一朗<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: yusuke224@stu.kanazawa-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 金沢大学助教 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: hyamaguchi@se.kanazawa-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 金沢大学教授 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

本研究では、複数の OD 需要データを用いて、旅行需要の季節変動が最適なマルチモード都市間交通ネットワーク形状に与える影響を把握することを試みた。具体的には、季節変動を組み込んだ最適な交通モードの組み合わせを導出する社会的費用最小化問題を混合整数線形計画問題として定式化し、数値解析を行った。その結果、従来の研究で報告された 2 ノードの仮想的なネットワークに、新しくノードを 1 つ追加した時、複数の交通モードを維持する可能性が大きくなることを示した。また、九州 7 県に東京都を加えた合計 8 ノードでの実ネットワークにおける分析では、季節変動の有無によって最適ネットワーク形状が変化することが分かった。

**Key Words:** *optimal-network shape, intercity travel, seasonal demand*

## 1. 研究背景・研究目的

我が国では、高速バス・鉄道・航空といった都市間交通が発達してきた。中でも鉄道と航空は競合関係になる区間も多く存在している。鉄道と航空では、「4 時間の壁」と呼ばれる議論がある。これは鉄道での所要時間が 4 時間以内である場合、鉄道の利用者数が航空の利用者数を上回るというものである。ただし、これは旅行者の選択傾向の話題であり、定量的・理論的な根拠があるわけではない。

また、日本をはじめとする先進国では、人口減少が問題となってきた。人口が減少することによって、移動需要が減少し、現在のサービスレベルの維持が困難になる可能性がある。地方航空路線では、熊本～静岡(2012)、中部～青森(2011)のように既に撤退した路線や休止した路線が存在する。また、既存の航空路線においても赤字路線も多数存在し、例えば小松羽田ビジネスサポートキャンペーン<sup>1)</sup>のように、これらの路線を維持するために税金が投入されている事例もある。こうした人口減少下において将来の都市間交通を議論する際、目指すべきネットワーク形状、つまり最適なネットワーク形状を把握することは重要である。

最適なネットワーク形状を把握する際、可能な限り正確な移動需要を把握することが必要である。図 1 は、東京都から秋田県への 1 年間の旅行者数を表している。この図を見ると、黄色い帯で示されるように、ゴールデンウィークやお盆、年末年始において、需要が平時の 4～8 倍程度になっていることが読み取れる。したがって旅行需要には「季節変動」が存在する。また図 2 は、石川県から東京都への旅行者数を表している。図 1 と図 2 を比較すると、後者は年中安定した需要が存在しており、突出して大きな需要があるわけではない。このように、旅行需要の季節変動の大きさは OD ペア毎に異なっている。この旅行需要の季節変動は最適なネットワーク形状にどのような影響を及ぼすのだろうか。

ここで、既往研究について整理する。航空と高速鉄道の相互作用に関する研究は、国内外で数多く行われてきた。(詳しくは、Zhang ら(2019)<sup>2)</sup>のレビュー論文を参照)。これらの多くは、高速鉄道が航空に与える影響について検証したものである(Adler ら(2010)<sup>3)</sup>、Albalade ら(2015)<sup>4)</sup>、Jian ら(2016)<sup>5)</sup>、Xia ら(2019)<sup>6)</sup>。これは近年、アジア諸国をはじめとして高速鉄道が導入されている、もしくは計画されているためだと考えられる。また日本ではリニア新幹線の建設が進められており、リニア新幹線の導入が航空に与える影響に関する研究も存在する。例えば

Takebayashi and Yamaguchi(2022)<sup>7)</sup>では、このリニア新幹線の導入が、航空と鉄道に及ぼす影響を明らかにしている。また、Fuら(2014)<sup>8)</sup>は、リニア新幹線の導入と、CO2排出量に対する課税の代替水準が、航空輸送サービスとリニア新幹線の需要に与える影響に関して分析している。

これらの研究は、航空と高速鉄道（もしくはリニア新幹線）の両モードが維持される仮定のもとで行われている。

一方、最適な都市間旅客交通ネットワークを導出する研究も数多く存在する。Ryan(2014)<sup>9)</sup>らは、交通事業者と旅行者の両方の利害関係者にとって全体的なコストを最小化する最適なネットワークを示した。彼らはケーススタディとして、ヨーロッパ南西部のイベリア半島周辺における最適な航空・高速鉄道ネットワークを示した。また、最適なネットワークと、旅客の選好の異質性に着目した研究として、Kawasaki(2008)<sup>10)</sup>と Yamaguchi and Okumura(2014)<sup>11)</sup>が存在する。Kawasaki(2008)<sup>10)</sup>は、時間価値の高いビジネス客と時間的価値の低いレジャー旅行者の2種類の旅行者を考慮し、航空会社のネットワークを分析した。彼は、選好の異質性が大きい場合は、「航空会社の最適戦略は、ビジネス旅行者向けの高頻度サービス（すなわち、ハブアンドスポークネットワーク）とレジャー旅行者向けの低頻度だがダイレクトなサービス（すなわち、ポイントツーポイントネットワーク）の2種類のサービスを運営することである」と結論付けた。Yamaguchi and Okumura(2014)<sup>11)</sup>では、時間価値分とコスト関数が異なるマルチモーダルネットワークを考えた。彼らによれば、1) 時間値の分散が大きい場合にはデュアルモードのネットワークが最適であり、Kawasaki(2008)<sup>10)</sup>の結果と一致すること、2) 需要が減少する時期には、最適ネットワークがデュアルモードからシングルモードに変化する可能性があること、3) 最適ネットワークと均衡ネットワークの比較から、デュアルモードのネットワークは最適ではないにもかかわらず均衡している場合があることが判明した。

これら、最適なネットワーク形状を示す研究は、一時点のデータを用いて行われてきた。これは、我が国での全国幹線旅客純流動調査のような大規模な都市間旅行調査を高頻度で実施することは困難であったことに起因する。しかし実際の都市間移動を考えれば、移動需要は日々変動する特徴がある。図1で示したように、5月上旬のゴールデンウィーク、8月中旬のお盆、年末年始、の三回に移動需要が大きくなることが多い。最適な都市間旅客交通ネットワークを示した既往研究では、この需要の季節変動が考慮されていない。しかし近年、スマートフォンの発達により、日々の都市間移動データが取得できるようになった。そのため、需要の季節変動を扱うことができるようになった。例えばTeradaら(2013)<sup>12)</sup>は、

NTTdocomoが提供する位置情報データ「モバイル空間統計」を用いて人口を推定する手法を提案した。またImaiら(2021)<sup>13)</sup>は、位置情報データを交通分野へ活用し、モバイル空間ダイナミクスと呼ばれるモバイルネットワークの運用データに基づいて、起点-終点間のトリップを推定する手法を提案しており、この手法は、PT調査や道路交通センサスを補完する可能性を持つことを示した。

需要の季節変動を用いて最適な都市間交通ネットワークを示した研究に、本研究の先行研究である藤田ら(2022)<sup>14)</sup>がある。彼らは、Okumura et al.(2012)<sup>14)</sup>で提案された都市間旅客交通ネットワークの最適化の枠組み(MNPモデル、Multi-modal Network Planning Model)に、「旅行需要の季節変動」の要素を追加したモデルを提案している。そして需要が大きく季節変動が中程度の時、複数の交通モードを維持することが最適となりうることを示した。これは、季節変動が複数交通モードを維持する要因であることを示した重要な研究である。一方、2ノードの最もシンプルなネットワークで分析していることが課題である。

マルチモードの交通ネットワーク設計を考える際には、複数のODペアの組み合わせによって、複数のモードを混合する価値がでてくると期待される。例えば、鉄道路線では、様々なODの旅行者が1つの列車に混在している。あるリンクにおける固定費用と変動費用は、そのリンクをODとする旅行者以外の旅行者も含めて支払っている。つまり、単一のODペアのみであれば鉄道路線は不要であるようなケースでも、ほかのODペアと一緒に固定費用を負担することで、鉄道サービスを設定することが最適となるケースが考えられる。このような現象は、2ノードのシンプルなネットワークでは反映させることができない。そこで本研究では、旅行需要の季節変動が最適なマルチモード都市間交通ネットワークに与える影響を把握することを目的として、藤田ら(2022)<sup>14)</sup>で扱ったネットワークを拡張し、3ノード以上のネットワークを扱って分析していく。

本稿の構成は、以下の通りである。まず2.では、旅行需要の季節変動を扱った最適ネットワーク形状を導出する数理モデルを説明する(藤田ら(2022)<sup>14)</sup>からの引用である)。3.では、2ノードと3ノードの仮想都市における最適ネットワーク形状を導出する(2ノードでの分析結果は、藤田ら(2022)<sup>14)</sup>による結果の引用である)。またこの節では、藤田ら(2022)<sup>14)</sup>で提案されたべき分布モデルを用いて作成された仮想的な需要を使用して分析している。4.では、8ノードの実都市における最適ネットワーク形状を導出する。この節では、モバイル空間統計による移動データを用いて分析を行った。5.は本論文の結論である。

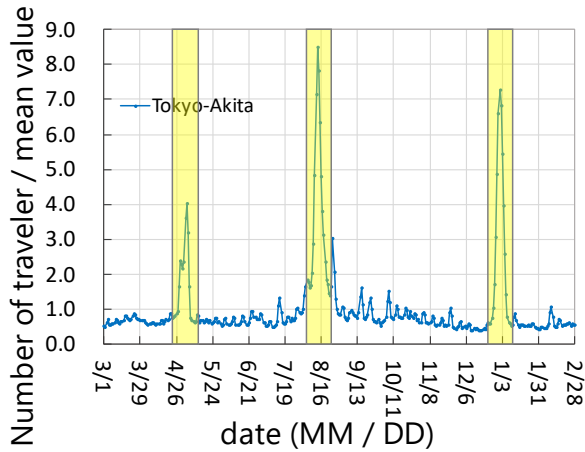


図1 東京都から秋田県への旅行者数  
(平均値が1となるように調整)

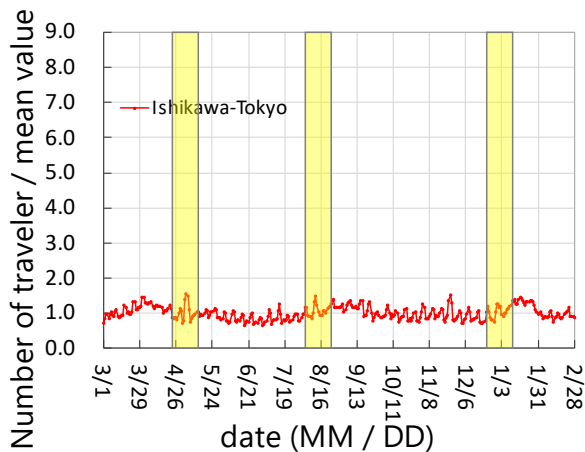


図2 石川県から東京都への旅行者数  
(平均値が1となるように調整)

## 2. 旅行需要の季節変動を考慮した最適ネットワーク導出モデル

### (1) モデルの概要

本研究では、需要が多時点の時系列変化、つまり需要の季節変動を考慮して最適なマルチモードネットワークを導出する数理最適化問題を扱う。具体的には、「旅行者全体の総旅行時間」と「交通事業者の総運営費用の和」として定義される社会的費用を最小化する。この問題では、複数時点の OD 需要と各リンクにおける運用コスト（所要時間の金銭換算値、ホームや線路等の運行に必要な施設にかかる固定費用、運転士等の交通モードを1便運航するために必要な可変費用、各交通モードの容量）のデータがインプットされ、最適なネットワーク形状と各リンクにおける交通モードの運行本数・旅行者数のデ

ータが導出される。本研究のモデルでは、OD 交通量は所与であり、交通サービスの良し悪しによって変わらないものとする。また、各旅行者の経路・交通モード選択は社会的最適となるように決定される。

この数理最適化問題は、操作変数にリンク交通サービスの運行有無の(0,1)変数と自然数である運行本数を含んでおり、目的関数や制約条件が全て線形である、混合整数線形計画問題として定式化できる。このモデルは、藤田ら(2022)<sup>14</sup>で用いられたモデルから、計算負荷を軽減するように修正している。また、藤田ら(2022)<sup>14</sup>のモデルは、Okumura et al. (2012)<sup>15</sup>で定義されたMNPモデルを元に提案されたものである。

### (2) モデルの定式化

ここでは、多時点の需要を扱えるように修正されたMNPモデルの定式化を述べていく。

#### a) モデルにおける変数

まず、ネットワークは都市ごとのノード  $i \in N$  と、それらのノードをつなぐリンク  $l \in L$  で構成される。ここで  $N$  はノード集合、 $L$  はリンク集合を意味する。そして、このネットワークを旅行する旅行者数は所与である。ある日  $d \in D$  におけるノード  $k \in N$  からノード  $n \in N/k$  への旅行数を  $V_{k,n,d}$  とする。ここで、リンク  $l$  を通過するためにかかる所要時間コストを  $T_l$  とする。この所要時間コストは、所要時間に時間価値を掛けて金銭換算したものとして考える。ここで、時間価値は全ての旅行者で一定であると仮定する。また、各リンクにおける交通事業者の条件として、1便当たりの最大容量を  $H_l$ 、施設の建設費や維持管理などの提供座席数にかかわらず固定的にかかる費用を  $G_l$ 、運行本数に比例してかかる変動費用を  $E_l$  とする。これらは、リンクごとに設定されるものとする。以上の変数が、本モデルにおいて外生的に設定する変数である。

一方、内生変数は次の3つである。1つ目は、リンクの交通サービスの有無を表す 0-1 変数  $\delta_l$  である。2つ目は、交通サービスを運行するネットワーク上を流れる旅客数を表す変数  $x_{l,k,d}$  である。これは、出発地  $k$ 、時点  $d$  ごとに定義される。3つ目は、リンクごとに定義される1日当たりの最大運行本数  $f_l$  である。ここで、交通サービスの有無  $\delta_l$  と、1日当たりの最大運行本数  $f_l$  は時点ごとに変化しないものとして設定している。これは、繁忙期に必要な運行本数を閑散期でも運行することを意味する。実際には、航空ダイヤや新幹線ダイヤが日々変動し、需要に即した運行を行っているように、旅行需要の季節変動に応じて運行コストを調整することはある程度可能であると推測できる。しかし、繁忙期の大きな需要に対

応できるような機材や車両，設備を用意する必要があり，そこに大きなコストがかかることから，この仮定は一定の合理性があるものだと考えられる。

## b) 目的関数

本モデルで用いる社会的費用は，以下のように定式化される。

$$SC(x, \delta, f) = \sum_{l \in L} T_l \sum_{d \in D} \sum_{k \in N} x_{l,k,d} + \left( \sum_{l \in L} G_l \delta_l + \sum_{l \in L} E_l f_l \right) \quad (1)$$

式(1)の右辺第一項は旅行者の総所要時間の金銭換算値を，第二項は交通事業者の固定費用，第三項は交通事業者の変動費用を表している。運賃は旅行者から交通事業者への移転であり，キャンセルアウトされることになるために，本モデルでは扱わない。また本モデルでは，旅行者数が所与であり，全ての旅行が実現される制約が付与されるため，仮に旅行者数が非常に小さく一人当たり莫大な費用がかかったとしても，「交通サービスは提供されない」といった解は得られない特徴がある。

## c) 制約条件

本研究では，交通量保存則・容量制約・運行制約の合計3つの制約式を設定している。

初めに，交通量保存則は，以下の2式のように表される。

$$\sum_{l \in L_{d=n}} x_{l,k,d} = V_{k,n,d} + \sum_{l \in L_{o=n}} x_{l,k,d} \quad (2)$$

$$\forall n \in K, k \in (K/n), d \in D$$

$$\sum_{l \in L_{d=k}} x_{l,k,d} + \sum_{n \in K} V_{k,n,d} = \sum_{l \in L_{o=k}} x_{l,k,d} \quad (3)$$

$$\forall k \in K, d \in D$$

ここで， $L_{d=n}$ は全てのリンク $L$ のうち，ノード $n$ に到着するリンクを意味する。式(3)は，左辺がノード $k$ を出発して，ある時点において着ノードに到着した旅客を意味し，右辺がそのノードを終点とする旅客とそのノードを通過して別のノードに流出する旅客の和である。式(4)は，左辺がある時点において発ノード $k$ を出発する旅客を，右辺がそのノードから各リンクを介して出発していく旅客の総和を示している。

次に，容量制約について記述する。ある時点に各リンクを利用する旅行者数は，それぞれのリンクの運行本数から計算される容量の範囲内にある必要があり，以下のように定式化される。

$$\sum_{k \in K} x_{l,k,d} \leq H f_l \quad \forall l \in L, d \in D \quad (4)$$

さらに，運行制約について記述する。あるモードを運行しないとき，そのモードの旅客数は0である必要があるため，これを十分に大きな定数 $M$ を用いて以下のように定式化する。

$$\sum_{d \in D} \sum_{k \in K} x_{l,k,d} \leq M \delta_l \quad \forall l \in L \quad (5)$$

ここで， $M$ は，リンクを通過する交通量より十分大きい定数とする。

最後に，内生変数の定義域として，以下の条件を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} x_{l,k,d} &\geq 0 \quad \forall l \in L, k \in N, d \in D \\ \delta_l &\in (0,1) \quad \forall l \in L \\ f_l &\in N \quad \forall l \in L \end{aligned} \quad (6)$$

ここで，(6)の $N$ は自然数集合を意味している。

## d) 最適ネットワークを導出する数理最適化問題

以上で述べられた条件をまとめる。本研究では，社会的費用を最小化するように，旅行者数ベクトル $x$ ，ネットワーク形状 $\delta$ ，運行頻度ベクトル $f$ を導出する数理最適化問題は，次のように定式化される。

$$\begin{aligned} \min_{(x,\delta,f)} SC(x, \delta, f) \\ \text{s.t. 式(2), (3), (4), (5), (6)} \end{aligned} \quad (7)$$

この問題は，全て線形式で構成されており，上記で述べた通り，少数の整数制約を含む混合整数線形計画問題である。したがって多くのソフトウェアに実装されている混合整数計画法のプログラムパッケージを利用して容易に解くことができる。今回の数値計算ではMATLAB2022を用いた。

## (3) モデルの設定

次節以降，本研究で扱うネットワークと数値実験の結果を示すが，その前に本研究で用いた外生変数を表1に示す。本研究では，鉄道と航空サービスの大きな特徴を踏まえて，次のような条件を満たすように設定した。1)1日当たりの固定費用 $G_l$ は，線路や周辺設備の建設費を踏まえて航空より鉄道の方が大きい。2)1日当たりの変動費用 $E_l$ は，機材の準備費用や1便当たり必要となる人件費などを加味すると，鉄道より航空の方が大きい。3)固定費用と変動費用は，距離に比例して大きくなる。4)1便当たりの容量 $H_l$ は，航空ではB737やA320，鉄道では新幹線のオーダーとなるように設定している。また本研究では，時間価値を変動させることが可能なモデルを提案しているが現段階では，時間価値を0.3(万円/時間)/60(分)の値を用いている。これらの設定は，後述する数値計算結果において，ネットワーク形状の変化がよく見られる値を選択している。一方，MNPモデルを用いた先行研究のものと大きな差異はない。

表1 外生変数

	航空	鉄道
固定費用 $G_l$ (/日)	100	$\frac{375}{180}t_{rail}+375$
変動費用 $E_l$ (/便)	60	$\frac{20}{180}t_{rail}+20$
容量 $H_l$ (人/便)	200	1000
時間の金銭換算値 $T_l$ (/分)	$500 \times 10^{-3}$	

### 3. 仮想都市における最適ネットワーク形状

#### (1) 分析の概要

ここでは、ノードが2つまたは3つの仮想都市を設定し、前節で述べたモデルを用いた数値計算の結果を示す。ただし、ノードが2つの数値計算結果は藤田ら(2022)<sup>14</sup>で示されているため、本稿オリジナルとなる結果はノードが3つ以上に拡張した部分である。したがって、次項では藤田ら(2022)<sup>14</sup>で示した結果を引用して2ノードにおける数値計算結果を説明し、3ノードでの分析へと拡張していく。

また本節では、仮想的な需要を設定している。具体的には、藤田ら(2022)<sup>14</sup>で示したべき分布モデルから得られる季節変動を表す係数 $\alpha$ を用いて、時系列変化のある365時点分の仮想的な需要を作成した。

#### (2) 2ノードにおける最適ネットワーク形状

概要でも述べたように、本項では藤田ら(2022)<sup>14</sup>で示した結果を引用しながら説明する。

図3は、前節のモデル・パラメータを用いた数値計算の結果である。 $\alpha = -0.000$ は旅行者数の変化が全くないケースであり、既往研究で議論されてきたパターンを示している。そこから季節変動の大きさを表す係数 $\alpha$ の絶対値が大きくなるにつれて、季節変動が大きくなることを示している。係数 $\alpha$ の値は、 $\alpha = -0.100$ と $\alpha = -0.279$ を用いている。後者は、都道府県ペアの $\alpha$ 推定結果の平均値を示しており、例えば神奈川県から北海道への旅行需要に類似する。また、前者は比較的季節変動が小さな設定である。図の横軸は1日当たりの平均旅行者数を表しており、縦軸は鉄道と航空の所要時間差を表している。航空の所要時間は、 $T_{air} = 120$ として固定しているため、図の上に行くほど鉄道と比べて航空の方が条件はいい(所要時間が短い)ことを表している。

係数 $\alpha$ による変化を見ていくと、季節変動が大きくなる(係数 $\alpha$ の絶対値が大きくなる)と、「鉄道のみ」と「鉄道+航空」が最適となる領域が広がる。特に、 $\alpha = -0.279$ では、「航空のみ」の領域がかなり小さい。

つまり、平均旅行者数が特に小さい状態でない限り、鉄道で移動できる状況は確保した上で、特に鉄道の所要時間がかかる領域では航空も併用することが最適となる。

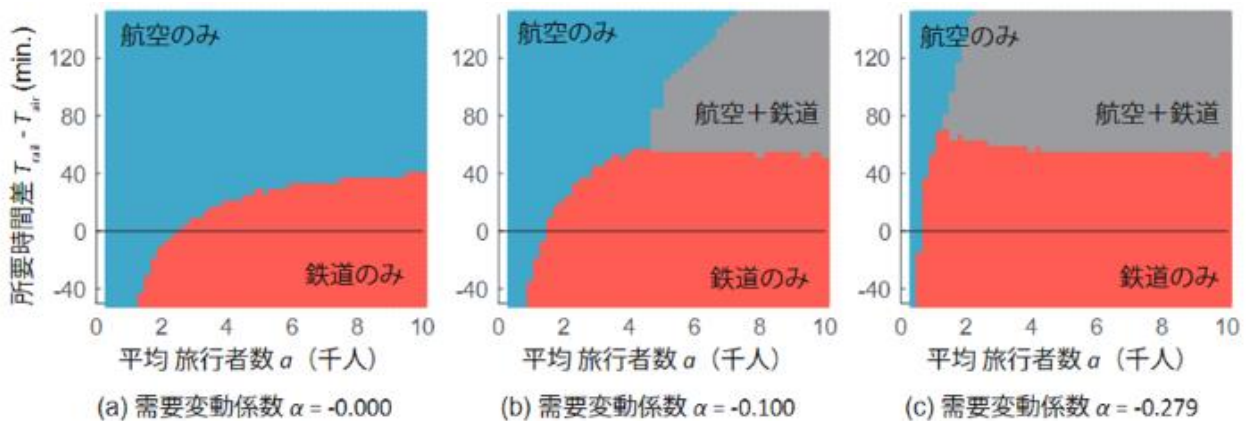


図3 365時点の需要量・鉄道と航空の所要時間差と最適ネットワーク形状の関係(藤田ら(2022)<sup>14</sup>より引用)

### (3) 3ノードにおける最適ネットワーク形状

#### a) 計算設定

ここでは、3都市間をそれぞれ鉄道と航空が結び得るネットワークを考える。これは、2都市間のネットワークでは複数のOD需要を考慮できないためである。ここでは、前項までの結果に、3つ目のノードが加わった場合の最適なネットワーク形状を導出していく。季節変動の大きさは、全てのODペアで $\alpha = -0.279$ と設定する。次に、各都市間を移動する際に必要な所要時間を述べる。本項では前項と同様に、航空の所要時間を $T_{air} = 120$ と設定する。鉄道の所用時間は、AB間を $T_{rail,AB} = 180$ と固定する一方、AC, BC間を $T_{rail}^{BC=AC} = 90$ ,  $T_{rail}^{BC=AC} = 180$ ,  $T_{rail}^{BC=AC} = 240$ の3つのパターンを考える。つまり、都市Cは図4のように、都市Aと都市Bから等距離に存在することを意味している。また、前項までの2都市間における数値計算は、都市Cが無限に遠い場所に存在するパターンであると解釈することができる。

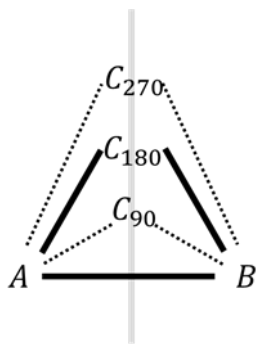


図4 都市Cが存在する場所 (藤田ら(2022)<sup>14)</sup> より引用)

#### b) 数値計算結果

上記の設定に基づいて、2都市間・3都市間ネットワークの最適な交通モードの組み合わせを算出した結果が図5である。図5(a)は、2都市間において、航空の所要時間が $T_{air} = 120$ 、鉄道の所要時間が $T_{rail} = 180$ である場合の最適な交通モードの組み合わせを示した。

この状態から、都市Aと都市Bから同一の距離にある都市Cを加えた場合を考える。図5の(b)~(d)は、都市Aと都市Bから同一の都市Cが、b)両都市から比較的遠い場合 ( $T_{rail}^{BC=AC} = 240$ ) と、c)3都市間全てで距離が等しい場合、 ( $T_{rail}^{BC=AC} = 180$ )、d)両都市から比較的近い場合 ( $T_{rail}^{BC=AC} = 90$ ) を想定し、1日当たりの平均旅行者数が増加するにつれて最適な交通モードの組み合わせがどのように変化していくか、数値計算を行った図である。ここでは、都市Cを加えた場合に、AB間の最適ネットワーク形状がどのように変化するか注目する。

初めに、3つの都市が全て等距離にある場合を考える ( $T_{rail}^{BC=AC} = 180$ )。図5(a)を見ると、平均旅行者数が800~2800(人/日)の時、「鉄道のみ」を運行するネットワークが最適である。一方、図5(c)を見ると、同一の範囲において、AB間を航空、AC, BC間を鉄道が運行するネットワーク形状が最適となる。この時、ABをODとする旅客の一部が所要時間の短い航空を利用し、残りの旅客は都市Cを経由した迂回ルートを利用している。航空は、旅客の所要時間が短い一方、1便当たりの運航費用である可変費用が大きい。そのため、全ての旅客を航空で結ぶのは莫大なコストであり、社会的に非効率的なネットワークとなる。このときABをODとする旅客がCを経由することで、ACやBCをODとする旅客と合わせ、移動量が大きくなる。こういった場合は、固定費用が大きく可変費用が小さい(つまり大量輸送に強みを持つ)鉄道を運行することが最適となる。

次に、都市Cが都市Aと都市Bから比較的近い場合を考える。図5(d)を見ると、平均旅行者数が400~1400(人/日)のとき、AB間を直行する交通モードが存在しない。しかし、平均旅行者数が増えるとAB間を直行する航空を運行し運行することが最適なネットワークとなる。この場合、鉄道の所要時間が $AB=AC+CB$ となり、都市Cを経由しようがしまいが、AB間の所要時間は変わらない。このため、AB間で交通モードを設定するより、Cを経由する交通モードのみを設定した方が社会的費用は小さくなる。またこの時、航空よりも可変費用が小さく、季節変動に対応しやすい鉄道のみを運行することが最も効率的となる。

最後に、都市Cが都市Aと都市Bから比較的遠い場合を考える。図5(b)を見ると、都市Cへ向かう交通モードのうち、航空は必ず維持されていることが分かる。これは、鉄道の所要時間が航空の所用時間の2倍あるため、高い固定費用を払って航空を運行することが、旅行者の総所要時間が短くなり、社会的費用が小さくなるのであろう。また、AB間に注目すると、需要が小さいときは「航空のみ」を運行することが最適となる。需要が大きくなるにつれて、固定費用が大きい鉄道を運行することになり、平均旅行者数が3200(人/日)以降では両方の交通モードを維持することが最適となる。

以上のように、3つ目の都市が他の2都市に近くなると、複数の交通モードを維持することが最適な領域が大きくなる。したがって、マルチモーダルネットワークを設計する際は、先行研究で示した「需要の季節変動(時系列変化)」だけでなく、「都市の配置」も重要な要因であると言える。

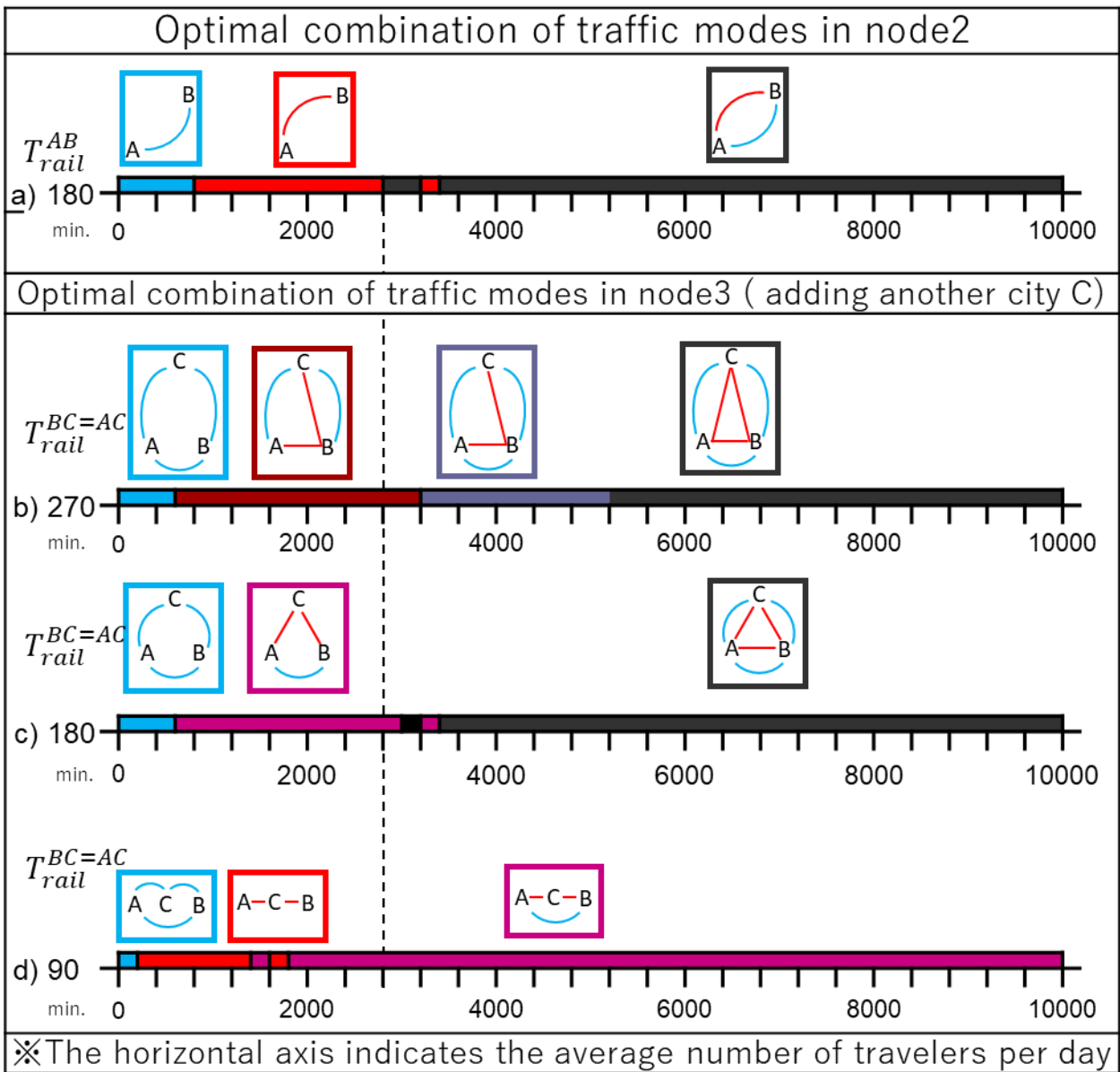


図5 2ノード・3ノードにおける最適な交通モードに組み合わせ

#### 4. 実都市における最適ネットワーク形状

##### (1) 概要

ここでは実都市を対象とした、ネットワークを4ノード以上に拡張した数値計算を行う。具体的には図6のように、九州7県に東京都を加え、各都県にノードを1つずつ設定した合計8ノードで分析を行った。

また前節と異なり、べき分布モデルから得られる季節変動を考慮した実際の都市間移動データを用いた分析を行う。具体的にはモバイル空間統計を用いる。このデータは、居住地ごとの滞在人口であるため厳密には移動と異なるが、室井ら(2015)<sup>5)</sup>によれば、移動量を計測する代理指標として活用しうることが確認されている。データの利用期間は、2018年3月1日から2019年2月28日

までの365時点であり、これは新型コロナウイルスによる影響がない期間である。

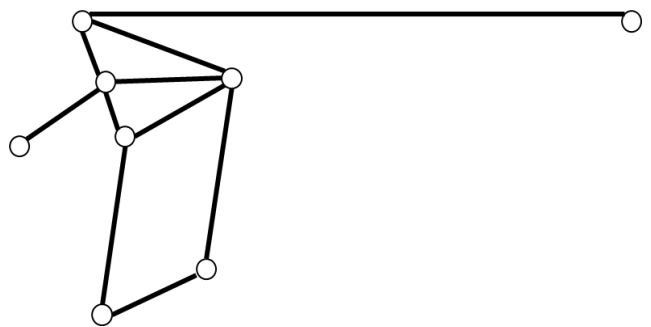


図6 設定するネットワーク

##### (2) 数値計算結果

上述の都市間移動データを用いて数値計算を行なった。

ここでは季節変動がある場合とない場合の2つのパターンで分析する。

はじめに、季節変動がないパターンについて説明する。この時需要は、各 OD パターンの平均値を計算し、それを 365 時点分代入する。このようにして得られる都道府県移動データを用いて最適ネットワーク形状を導出した結果を図7で表す。図7を見ると、東京から福岡、佐賀から大分の鉄道路線と東京から佐賀の航空路線が運行されないことが最適な結果となっている。

次に、季節変動があるパターンについて説明する。この時需要は、各 OD パターンの値を 365 時点そのまま代入したものをを用いる。この条件のもと、最適なネットワーク形状を導出した結果が図8である。日々の需要が一定である図7では、東京から福岡、佐賀から大分の鉄道路線を設定しないことが最適であった一方、季節変動を考慮した図8では鉄道路線を運行することが最適となることが確認できた(図8のオレンジの部分)。つまり、需要の季節変動(時系列変化)を扱わない従来のモデルでは、複数の交通モードを維持する必要性を過小評価している可能性がある。そして、マルチモーダルネットワークを設計する際、需要の季節変動も考慮することが必要である、ということが示されたと言えるだろう。

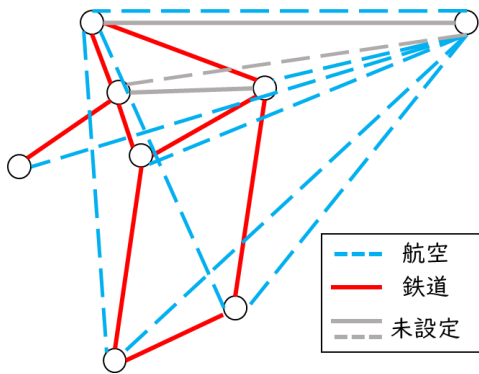


図7 季節変動がない場合の最適ネットワーク形状

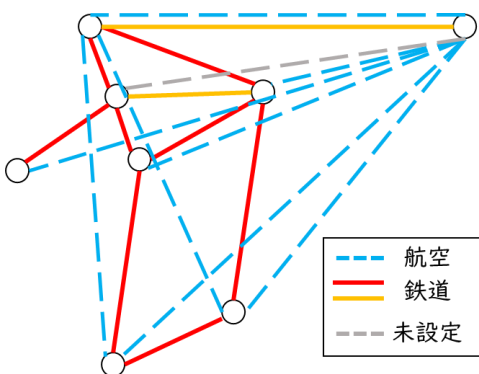


図8 季節変動がある場合の最適ネットワーク形状

## 5. おわりに

本研究では、モバイル空間統計データから得られる「季節変動」を考慮して、最適な都市間交通ネットワーク形状の方向性を把握するために、藤田ら(2022)<sup>14)</sup>で扱ったネットワークを3ノード以上に拡張した数値計算を行った。これによって、旅行需要の季節変動(時系列変化)を扱うことがマルチモーダルネットワークを設計する上で重要な要因の一つである可能性を示した。

初めに藤田ら(2022)<sup>14)</sup>にて提案された、旅行需要の季節変動を所与としたときの最適な都市間交通モードの組み合わせを数値的に導出するモデルを説明した。

そして、3ノードの仮想都市における数値計算では、仮想的な需要を用いた。藤田ら(2022)<sup>14)</sup>で示したべき分布モデルから得られる季節変動を表す係数 $\alpha$ を用いて、時系列変化のある365時点分の仮想的な需要を作成した。具体的な数値計算では、2ノードのネットワークから、時間距離や季節変動の条件を同様にした都市を1つ追加して3ノードのネットワークで行った。この時は、需要変動がある一定以上になると、ピーク時のネットワーク全体の移動量が大きくなるため、複数の交通モードを維持することが最適となることが明らかになった。これはつまり、最適な都市間交通ネットワーク形状を考える時は、藤田ら(2022)<sup>14)</sup>で示した「季節変動(時系列変化)」だけでなく「都市の配置」も重要な要因である。

さらに、8ノードの実都市における数値計算では、モバイル空間統計データから得られる季節変動データを用いて数値計算を行った。九州7県と東京都の各都県に一つずつノードを設定し、季節変動がない場合とある場合について、最適ネットワーク形状を導出した。前者は、各 OD パターンの平均値を計算し、それを 365 時点分代入した需要を用いており、後者では、各 OD パターンの需要をそのまま用いた。数値計算では、季節変動の有無によって最適なネットワーク形状が変化することを示した。

なお、本研究で示した結果を読み取る際には注意点がある。一つ目の注意点は、本研究で示された固定費用や変動費用等の外生変数は、現実の値を厳密に反映して設定できているわけではない。これは、正確な値を得ることが困難であることから、大まかな大小関係を留意するにとどまっているためである。そのため、季節変動の有無による差異の方向性は信用できるが、最適ネットワーク形状そのものが正確である保証はない。その一方で、外生変数を現実に設定することができれば、数値計算の結果も精度よく議論できる可能性がある。

今後は、実都市のネットワークをさらに拡張していく方針である。最終的には沖縄を除く46都道府県ネットワーク(沖縄には他県を結ぶ鉄道がないため)で分析

することを目標としている。この目標を達成すると、鉄道ネットワークを所与として航空ネットワークの最適形状を導出することができる。すると、例えば、「リニア新幹線が開業し、東京～名古屋～大阪の所要時間が大幅に短縮された際、航空路線が目指すべきネットワークを把握すること」が可能となり、本研究が社会的に有用であることを示すことができるだろう。

**謝辞**：本研究は、科学研究費補助金 20H02270, 21H01455, 22H00222, 文部科学省卓越研究員事業として支援を受けた研究活動による成果の一部です。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省 航空局・国土交通省 大阪航空局：航空・空港の利用促進のための取組調査（大阪航空局管内）,2020/7. [https://www.cab.mlit.go.jp/wcab/file/pdf/20201016\\_chosa.pdf](https://www.cab.mlit.go.jp/wcab/file/pdf/20201016_chosa.pdf) (last access: 2022/09/25)
- 2) Zhang, A., Wan, Y., & Yan, H. (2019). Impacts of high-speed rail on airlines, airports and regional economies: A survey of recent research. *Transport Policy*, 81, A1-A19
- 3) Adler, N., Pels, E., & Nash, C. (2010). High-speed rail and air transport competition: game engineering as tool for cost-benefit analysis. *Transportation Research Part B*, 44, 812-833
- 4) Albalade, D., Bel, G., & Fageda, X. (2015). Competition and Cooperation between High-Speed Rail and Air Transportation Services in Europe. *Journal of Transport Geography*, 42, 166-174
- 5) Jiang, C., & Zhang, A. (2016). Airline network choice and market coverage under high-speed rail competition. *Transportation Research Part A*, 92, 248-260
- 6) Xiam, W., Jiang, C., Wang, K., & Zhang, A. (2019). Air-rail revenue sharing in a multi-airport system: Effects on traffic and social welfare. *Transportation Research Part B*, 121, 304-319
- 7) Takebayashi, M. & Yamaguchi, H. (2022). Managing a multiple-gateway airport system with super high-speed rail. *Journal of Air Transport Management*, 99
- 8) Fu, X., Zhang, A. & Lei, Z. (2014). An analysis of travel demand in Japan's intercity market: Empirical estimation and policy simulation. *Journal of Transport Economics and Policy*, 48, 97-113
- 9) Ryan, F., Filipe, M. & Vilaca, M.,(2014). Optimizing High-Speed Rail and Air Transport Intermodal Passenger Network Design, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2448
- 10) Kawasaki, A. (2008). Network effects, heterogeneous time value and network formulation in the airline market, *Regional Science and Urban Economics*, 38, 388-403
- 11) Yamaguchi, H. & Okumura, N., Time value distribution and multi-modal intercity travel network shape, *Theoretical analysis for the tyoical setting, Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 138, 602-611
- 12) Terada, M., Nagata, T. & Kobayashi, (2013). M., Population Estimation Technology for Mobile Spatial Statistics, *NTT docomo Technical Journal*, 14
- 13) Imai, R., Ikeda, D., Shingai, H. & Nagata, T., (2021). Origin-Destination Trips Generated from Operational Data of a Mobile Network for Urban Transportation Planning, *Journal of Urban Planning and Development*, 147
- 14) 藤田雄介, 山口裕通, 中山晶一朗：旅行需要の季節変動と最適な長距離交通モードの組み合わせの関係, *土木学会論文集 D3, Vol.77, No.5, pp127-136, 2022*
- 15) Okumura, M., Huseyin Tirtom, H. & Yamaguchi, H., (2012). Planning model of optimal modal-mix in intercity passenger transportation, *Proceedings of International Conference on Low-carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings*, 309-314

(2022.9.29 受付)

## Optimal Multimode Intercity Transit Network Based on Seasonal Travel Demand Data

Yusuke FUJITA, Hiromichi YAMAGUCHI and Shoichiro NAKAYAMA

This research attempted to understand the impact of seasonal variations in travel demand on the optimal multimode intercity transportation network shape using multiple OD demand data. Concretely, the social cost minimization problem to derive the optimal combination of transportation modes incorporating seasonal variations was formulated as a mixed integer linear programming problem, and numerical analysis was conducted. The results show that when one new node is added to the two-node virtual network of previous studies, the possibility of maintaining multiple traffic modes increases significantly. The analysis on a real network with eight nodes, including seven prefectures in Kyushu and Tokyo, showed that the optimal network shape changes depending on the presence of seasonal variations.