

# 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>正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ (〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1)

<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、複数時点の OD 需要データを用いて、旅行需要の季節変動が最適な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、日本を大まかに捉えたネットワークを用いた分析において、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。特に、従来の研究で行われてきた 1 時点での分析では、鉄道ネットワークを維持する価値を過小評価していた可能性があることが明らかになった。

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

## 1. 研究背景・研究目的

日本では都市間交通が発達してきた。我々は鉄道、航空といった公共交通機関を用いて、日本中様々な都市へ自由にアクセスすることが可能になった。

鉄道では、1964年に東京～新大阪駅間で東海道新幹線が開業して以来、山陽新幹線（新大阪～博多）・東北新幹線（東京～盛岡）・上越新幹線（大宮～新潟）が国鉄時代に、全国新幹線鉄道整備法を根拠に整備された。国鉄が解体し、JRとして民営化された後も、北陸新幹線（高崎～金沢）・九州新幹線（博多～鹿児島中央、武雄温泉～長崎）・北海道新幹線（新青森～新函館北斗）が開業した。現在も北陸新幹線（金沢～敦賀）・北海道新幹線（新函館北斗～札幌）・中央新幹線（品川～名古屋）において建設工事中であり、着実に新幹線ネットワークを広げている。

航空では、1931年に羽田空港が開港して以来、空港法に基づき多くの空港が開港してきた。空港は、「拠点空港」・「地方管理空港」・「その他の空港」・「共用空港」の4つに分類され、2022年現在では合計97の空港が存在している。地方や離島にも空港が整備されていることに加えて、2000年代から空港の数は大きく変わっておらず、日本における空港整備はほぼ完了したと言われ

ている。荒谷ら(2010)<sup>1)</sup>で整理されているように、日本国内における航空ネットワークは、2000年に新しい航空法が整備されてことをきっかけに、競争促進と自由化へと転換された。具体的には、参入・撤退の自由、増減・廃止の自由、運賃の自由化を表す。特に、参入・撤退の自由については1986年以降、国内路線参入の基準を段階的に緩和し、1997年には完全廃止されている。この航空政策によって、1998年には新規参入企業としてスカイマークエアラインズが東京～福岡間に、北海道国際航空が東京～札幌間に参入している。以降、国内の航空ネットワークでは格安航空会社が参入する等、大きく発展している。以上、新幹線や航空が発達した現在では、都市間交通において、旅客は鉄道と航空のマルチモードを補完的に駆使して目的地へ向かうことが可能となっている。一方、一部の区間では両者が競合している場所もある。

また近年、日本を含む先進国では人口減少が起こっている。総務省統計局によると<sup>2)</sup>、総人口は平成20年をピークに、23年以降は減少している。人口減少が起こると、公共交通では移動需要が減少するため、現在のサービスレベルを維持することが困難になることが予想される。実際に鉄道では、平均輸送人員の減少を根拠に、赤字路線を廃止している。令和元年以降、北海道旅客鉄道において日高線（鶴川～様似）、札沼線（北海道医療大学～新十津川）、石勝線（新夕張～夕張）が廃止されて

いる。また東日本旅客鉄道においても大船渡線と気仙沼線が BRT 化された<sup>3)</sup>。また、西日本旅客鉄道では 2022 年 4 月 11 日のニュースリリースにおいて、平均通過人員が 2,000 (人/日) 未満の線区の収支率等を開示し、地域の公共交通計画について、鉄道の在り方に関する議論を促す姿勢を見せている<sup>4)</sup>。一方航空では、小松-仙台便や熊本-静岡便、中部-青森便といった地方路線がすでに廃止になっている。橋本ら(2014)<sup>5)</sup>によると、地方航空路線を維持する方法として、①リージョナル小型機を活用することや、②LCC (Low Cost Carrier) の地方路線の参入が提案されている。これらの方策でカバーできない路線を国や地方自治体が支援することが必要であると提言している。また、赤字路線も数多く存在している。これらを維持するために助成金として税金が投入されており、例えば小松羽田ビジネスサポートキャンペーンが挙げられる。これは、石川県来訪者への多様な交通手段確保へ向けた航空利便性維持を目的とし、年間ビジネス利用者推計を約 10 万席増加させること目標とする政策である。このような事業は他の地域でも行われており、複数交通モードを共存させるために、税金が投入されている。税金を投入してまで共存させることが効果的な政策なのだろうか？

この疑問に答えるには、都市間交通ネットワークのベンチマーク (いわゆる最適形状) を把握することが必要である。なぜなら、ベンチマークで必要とされる路線は、たとえ赤字であっても税金の補助を受ける根拠となり得るからだ。また、正確なコストや詳細なネットワークで分析できなくとも、ベンチマークの傾向を把握することができ、注意すべき項目を明らかにすることが重要である。

ベンチマークを求める際、正確な需要を把握することが重要であるが、これまでは十分な、特に季節変動を含んだ旅行量データを入手することは困難であった。日本では都市間の移動実態を把握するために、1990 年から 5 年ごとに全国幹線旅客純流動調査<sup>6)</sup>が行われている。奥村ら(2011)<sup>7)</sup>で整理されているように、この調査は、航空、鉄道、幹線バス、幹線旅客船と乗用車でそれぞれサンプルを抽出し、各サンプルの当日のトリップについて真の出発地、目的地、トリップ目的、利用交通機関、利用経路、および個人属性を調査している。交通機関ごとに回収されたアンケート票に対して拡大係数を設定したうえで、統合、集計することにより、一つのトリップの中で複数の交通機関や便・列車を乗り継ぐ行動を把握できることが、他事業者ごとの統計調査には見られない大きな特徴となっている。しかし、純流動調査では、調査頻度が 5 年に一度であり、さらに調査時期が 11 月の平日、休日の各一日ずつとなっていることから、日々の需要変

動を把握することが難しい点が課題として挙げられる。

しかし、近年、通信インフラの整備が進展したことに伴い、人の移動行動を捉えることのできる位置情報データが登場してきた。特に、基地局での電波補足に基づくデータは、携帯電話の基地局との通信情報を活用して推計される携帯電話利用者の位置情報であり、統計的な推定によりエリア内における滞在人口を推計して算出された集計データである。このようなデータを活用することで都市間における移動需要を高頻度で把握することが可能となった。この情報を利用することにより、これまでほとんど明らかにされてこなかった、日々の需要変動を考慮した分析を行うことができる。例えば、図 1 は 2018 年 3 月 1 日から 2019 年 2 月 28 日の期間における東京都から秋田県への移動需要の推移を表している。ただし一年間の平均が 1 としている点に注意する必要がある。この図から、ゴールデンウィークやお盆、年末年始において大きな移動需要が発生していることがわかる。特にお盆は、平均の 8 倍以上の大きな需要が存在する。このように日本ではレジャーや帰省需要により、一年間に 3 回ピークが訪れることが多いと考えられる。以上のことから、都市間の移動には、「季節的な変動」が存在すると考えられる。また、図 2 は石川県から東京都への移動需要の推移を表している。図 1 と比較すると、一年を通して大きなピークがないことが読み取れる。このように、旅行需要における季節変動の大きさは OD ペア毎に大きく異なる。旅行需要の季節変動を考慮すると、目指すべきネットワークの形は変わるのだろうか？この疑問には、従来まで使われてきたデータとモデルでは答えることができず、季節変動を把握できるデータと複数時点の需要を自由に組み込むことができるモデルが必要である。

そこで、本研究では将来のマルチモーダルなネットワークについてより精度よく議論できるようにするために、ベンチマークとなる季節変動を考慮した社会的に最も効率的なネットワークを示すことを目指す。また、日本の人口が減少傾向にあることや、需要が大きい時期と小さい時期が周期的に存在するため、都市間の移動需要を適切に把握することが重要な課題である。近年の位置情報データの登場により都市間の移動需要を高頻度で把握することが可能になり、この課題を解決しうる環境は整っているが、それを解析するための方法論とその効果はまだ十分に明らかになっていない。

以上の内容を踏まえ、本研究では、以下の二つを研究目的とする。一つ目は、複数時点の OD を考慮することができると最適ネットワーク形状を導出するモデルの提案を行う。二つ目は、実データである携帯電話位置情報を

利用した人口統計データと、日本のネットワークを用いて、最適ネットワーク形状の大まかな方向性と季節変動を考慮する価値を明らかにすることである。季節変動を考慮したものと考慮していないものを比較することによって、従来のデータ・分析で設計することによる問題点を明らかにし、ネットワーク設計における留意点を確認する。実データ、実ネットワークを用いた分析を行うことで日本が目指すべきネットワーク形状について議論することが可能となる。また本研究では、鉄道ネットワークを所与とし、航空ネットワークの最適な形を導出する分析を行う。さらに鉄道ネットワークを所与とした上で、現在建設中の新幹線が開業したことを想定し、鉄道における所要時間が短縮した際、目指すべき航空ネットワーク形状を導出しており、本研究の応用例を示している。

## 2. 既往研究の整理と本研究の位置付け

航空会社と HSR の相互作用に関する研究は、これまで数多く行われてきた（詳しくは Zhang ら(2019)<sup>8</sup>のレビュー論文を参照）。多くの研究は、HSR 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>9</sup>, Ablate ら(2015)<sup>10</sup>, Jian ら(2016)<sup>11</sup>, Xia ら(2019)<sup>12</sup>）。これは近年、アジア諸国をはじめとして HSR 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 SHSR（Super High Speed Rail, 日本ではリニア新幹線と呼ぶ）の建設が進められており、SHSR の導入が航空に与える影響について考察する研究も存在する。例えば Takebayashi and Yamaguchi(2022)<sup>13</sup>では、この SHRS 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>14</sup>は、SHSR 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 SHSR 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 HSR（もしくは SHSR）の両モードが維持される仮定のもとで行われている。しかし、日本では人口が減少しているため、都市間移動の需要が減少している。需要減少により、採算が取れない交通事業者も出てくる可能性がある。日本では、不採算路線の一部は政府の補助金によって支えられているが、将来、現存するすべての輸送サービスを維持することは不可能だろう。どのような路線に補助金を拠出すべきか議論することは、とても重要である。このとき、社会的に最も効率的な都市間旅客交通ネットワークを一つのベンチマークとして把握することで、必ず維持すべき路線などを明確化することができる。

最適な都市間旅客交通ネットワーク形状を導出する研究は、過去に国内外で数多く行われてきた。

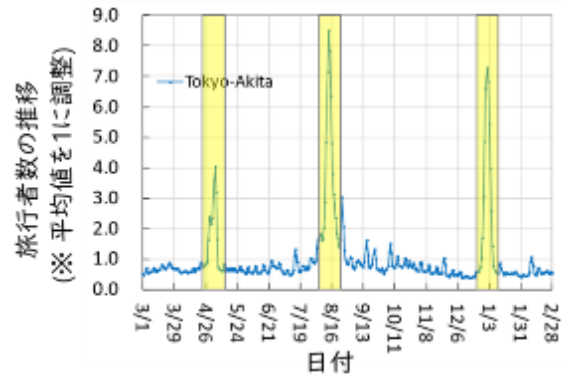


図1 東京都から秋田県への移動需要の推移

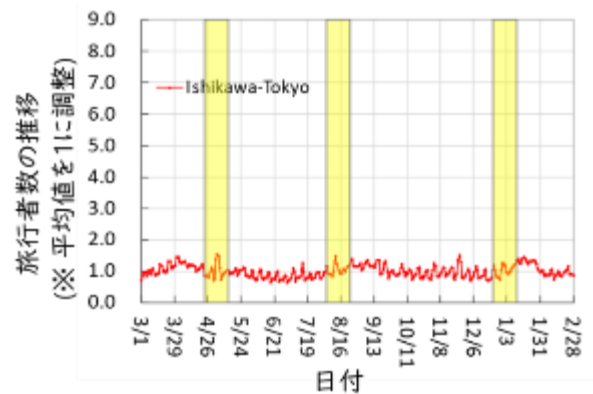


図2 石川県から東京都への移動需要の推移

Ryan ら(2014)<sup>15</sup>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・HSR ネットワークを示した。また Tirtom ら(2014)<sup>16</sup>は、CO2 排出量に関する制約下で社会的費用を最小にするネットワーク形状を導出する問題を、複数モードを考慮したネットワーク計画を行うための Muli-modal Network Planning Model（以下 MNP モデル）として定式化し、低炭素化政策が都市間交通ネットワーク形状に与える影響について分析した。また、実際にトルコの都市間交通ネットワークを対象に OD 交通量を外生的に与えた上で航空、在来鉄道、高速鉄道、高速バスの4つの交通モードの最適リンク頻度の差異や分担率の違いをみることで、CO2 排出量制約と移動利便性のトレードオフの関係の存在を確認している。さらに細ら(2018)<sup>17</sup>は、この MNP モデルを需要内生型に拡張し、移動利便性の向上が需要の拡大が最適ネットワーク形状に与える影響を分析している。また、仮想ネットワーク上のあるノードにおいて、航空とその他モードへの乗り継ぎ時間の改善がネットワーク全体に複雑に影響することを示している。

そして波床ら(2015)<sup>18)</sup>は、日本国有鉄道の解体・民営化直後の 1990 年を基準とし、期待一般化費用と期待所要時間の二つの評価指標を、当時公表されていた最も先の将来人口推計である 2025 年時点の人口分布を前提に遺伝的アルゴリズムを用いて幹線鉄道網の近似最適解を探索した。探索結果と実際の幹線鉄道網を比較し、1990 年代以降の幹線鉄道網整備について考察を行っている。波床らと同様に遺伝的アルゴリズムを用いた研究として渡邊ら(2015)<sup>22)</sup>があり、複数の目標を同時に考慮可能な、数理最適化に基づくネットワーク評価を可能とする手法を提案している。

最後に Kawasaki(2008)<sup>20)</sup>と Yamaguchi and Okumura(2014)<sup>21)</sup>は、最適なネットワークと旅客の選好の異質性に着目している。Kawasaki(2008)<sup>20)</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>21)</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) 時間価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)[21]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場合があること、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。

これらの研究では、全国幹線旅客純流動調査のような 1 時点の OD 需要データを用いることを想定したモデルで分析が行われている。一方で、本研究では、旅行需要の季節変動の大きさが最適マルチモーダル旅客交通ネットワーク形状にどのような影響を及ぼすかを把握するために、複数時点の需要を考慮することが可能な最適マルチモーダルネットワーク形状を導出するモデルの提案を行う。この方法は、複数時点の需要量を組み込むことで長距離交通の需要変動を考慮した点に特徴があり、従来の交通量調査・モデルでは十分に観測・考慮されてこなかった、季節変動性を考慮した最適ネットワーク形状の評価が可能となる。しかし、本研究では、季節変動がもたらす影響に注目するため、旅客の選好の異質性や他の交通モードに乗り換える抵抗の影響を無視していることに留意する必要がある。

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た。これは、従来用いられたデータがアンケート調査であることが原因である。例えば、全国旅客幹線純流動調査では、5 年に 1 回の頻度で秋の平日と休日にアンケート調査が実施されている。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ものだ。日本では具体的に、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。本研究では、このように需要が日々変動することを「需要の季節変動」と呼ぶ。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>22)</sup>は、NTT docomo 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>23)</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、藤田ら(2022)<sup>24)</sup>がある。彼らは、2 時点の需要差に注目した。2 時点の総需要が大きく、かつ需要差が中程度の時、マルチモーダルな交通ネットワークを維持するべきであることを示した。これは季節変動が、旅行者の選好の異質性などの要因を考慮せずとも複数の交通モードを維持することが最適であり、季節変動が最適ネットワーク形状を決定する一つの要因であることを示している。しかし、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。シンプルなネットワークでは、季節変動の影響のみを確認できるメリットがある。一方、乗り換えや迂回といったネットワーク性を考慮することができないことが課題として挙げられる。本研究では、卒業論文で扱ったネットワークを拡張し、より大規模なネットワークを扱っていく。

### 3. モデルの定式化

#### 1) モデルの概要

本研究では、最適な長距離交通モードを導出する数理最適化問題を扱う。具体的には、旅行者全員の総旅行時間と交通事業者の総運営費用の和と定義される「社会的費用」を最小化する。この時、最適な交通モードの組み

合わせ（航空・鉄道のそれぞれの運行有無）とそれぞれの運行本数，旅行者のフローが導出される．このとき，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．つまり，旅行者ごとの選好は反映されず，交通システム全体としての理論上の最も効率的なベンチマークを算出する．また本モデルでは，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．そして，所与とする OD 交通量の与え方として，旅行需要の季節変動を扱う．詳細は後述するが本研究では，「べき分布モデルを用いて仮想的に作成した需要変動」と，「モバイル空間統計データから得られる需要変動」の二種類の季節変動を考慮した需要を用いる．

なお，本研究では，旅行需要の季節変動の影響に着目するため，顕在した情報を基に作成した，需要の季節変動データを扱う．しかし，潜在的な需要も考慮すると，それは季節ごとに異なると予想される．例えば，お盆などの混雑する時期には，混雑していない時期と比較して，希望した日の旅行を諦める（需要が潜在化する）可能性が高いであろう．これらを考慮するためには，時期ごとの需要関数を考慮したモデルが必要となるが，本研究では比較的規模の大きいネットワーク上で，そのベンチマークの規則性を探索するために，無視することとする．なお，潜在化が一定のパターンで発生することを仮定する場合は，その需要データを入力することで，本研究で扱ったモデルにおいても潜在化による影響を議論することが可能である．このように，どのような需要を与えるか，議論を重ねることで本モデルを用いたさらなる研究を行うことが可能である．

本研究で提案するモデルにおける数理最適化問題は，操作変数にリンク交通サービスの運行有無を意味する，離散的な 0-1 変数を含んでいる．そのため，目的関数・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することができる．本研究のモデルは，Okumura et al. (2012)<sup>25</sup>や細・奥村 (2018)<sup>17</sup>で提案された MNP モデルを元にしており，需要の季節変動を扱う点において発展させたものである．

また，本研究では旅行者ごとの時間価値の異質性は扱わない．Yamaguchi and Okumura (2014)<sup>21</sup>では，時間価値の異質性とネットワークの最適・均衡形状の関係を明らかにしている．その結果，時間価値の異質性が十分に大きい場合にのみ，異なる特徴をもつ複数の交通モードを組み合わせたネットワーク形状が最適となりうることを示している．つまり，時間価値の異質性は，複数のモードの存在が望ましくなる一要因である．本研究では，この要因が存在しない状態の数値解析によって，「旅行需要の季節変動」も，複数のモードの存在が最適となりうる

条件であることが明らかにされる

## 2) モデルの定式化

ここでは，旅行需要の季節変動を扱えるように修正した，MNP モデルの定式化を述べていく．本研究では，需要の季節変動がネットワーク上の複雑な代替・補完関係にどのような影響を及ぼすか，システム最適の形状を複数のパラメータ・ネットワークで導出することによって，議論を展開していく．具体的には，実際の需要データを用いた分析として，日本全国（14 ノード）といったより大規模なネットワークを対象とした都市間ネットワークを用いて，より実用的な最適形状の特徴を明らかにしていく．本節では，大小様々なネットワーク形状にも対応可能である，より一般的な定式化として，本研究のモデルを説明する．

### a) モデルで用いる変数

はじめに，ネットワーク形状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．本研究では，時間価値は全ての旅行者で一定であると仮定する．各リンクにおける交通サービスの条件として，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  $E_l$  として扱っていく．これらはリンクごとに設定されるものとするが，本研究では交通モード（鉄道か航空）ごとに共通の値とする．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，リンク  $l$ ，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

本モデルの目的関数となる、社会的費用  $SC(x, \delta, f)$  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、社会的費用としては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。

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つの設定している。

初めに、交通量保存則は、以下の2式用いて表される。

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

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

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

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

ここで、 $L_{(d=n)}$ は全てのリンク  $L$ のうち、ノード  $n$ に到着するリンクの集合を意味する。式(2)は、左辺がノード  $k$ を起点とする旅行者のうちで、ある時点  $d$ においてノード  $n$ に到着した旅行者の数を意味し、右辺がそのノードを終点とする旅客 ( $V_{k,n,d}$ ) とそのノードを通過して別のノードに流出する旅客 ( $\sum_{l \in L_{o=n}} x_{l,k,d}$ ) の和である。式(3)は、一つ目の式と同様であるが、起点ノードでの制約を示す。このとき、左辺が時点  $d$ において発ノード  $k$ を出発する旅客の総数を示し、ここではこのノードを起点とする旅客も含む、右辺がそのノード  $k$ 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。また、本モデルでは、旅行者数が所与であり、これらの制約から全ての旅行が実現されるため、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。

次に、リンクごとの交通量の制限（リンク交通量は、頻度  $f_l$  と 1 便当たりの容量  $H_l$  の積より小さい）を示す制約条件は、下記のように表せる。

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

また、あるリンクにおいて交通モードを運行しない場合 ( $\delta_l=0$ )、該当するリンクを通過する旅行者数はすべての時点でゼロである必要がある ( $x_{l,k,d} = 0$ )。これを示すために、以下のような制約式も付加する。

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

ここで、 $M$ は、リンクを通過する可能性がある交通フローよりもはるかに大きい定数としている。本研究の計算では、全ての OD 需要を足し合わせた値を  $M$  として適用する。

最後に、内生変数の定義域として、下記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、 $N$ は自然数集合を示している。なお、本章で扱う大規模な計算の際は、非負制約を除いて解いている。

d) 最適ネットワーク形状を導出する数理最適化問題

以上、述べた条件をまとめた、社会的費用を最小するような、旅行者フローベクトル  $x$  とネットワーク形状  $\delta$ 、運行頻度ベクトル  $f$  を導出する数理最適化問題は、下記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、すべて線形式のみで構成されており、少数の整数制約を含む混合整数線形計画問題である。そのため、対象とするネットワークが大規模でない限り、一般的に用いられているソルバーを用いることで、容易に数値解を得ることができる。ただし本研究では、日本全国を対象とした 14 ノードのネットワークで分析を行っている。このように、比較的大きなネットワークにおいては、後述するように貪欲法に基づいて数値計算を行った。したがって本稿の数値計算では、MATLAB2022 に

貪欲法アルゴリズムを実装して分析を行っている。

### 3) 本研究で用いる解法

次章で述べる 14 ノードのような、比較的大規模なネットワークになると、容易に最適解を導くことはできない。これは、本研究が扱っている問題は組み合わせ最適化問題であり、さらに未知変数が 1,389,920 個 (14 ノード) という大規模な問題であることに由来する。リンクが 1 つ増えると未知変数の数が約 20,000 個増えるため、多項式時間で解くことが難しくなってくるからである。そこで本研究では、貪欲法と呼ばれる近似アルゴリズムを用いた分析を行う。一般に貪欲法を用いて解く最大化問題は 0.63-近似アルゴリズムであることが知られている。<sup>20)</sup>これは関数がどのように定められたものであったとしても、最適値の 0.63 倍以上の目的関数値を達成することが保証されており、この時の 0.63 を近似率と呼ぶ。最小化問題についても同様に近似率定義することができ、その場合は、近似率は 1 以上の値を取る。

本研究で用いる貪欲法のアルゴリズム、解析フローチャートを以下に図 3 に示す。初めに、初期値としてリンク集合  $S$  を全体集合とする。次に、目的関数である社会的費用を最小化するための、カットするリンク候補  $l \in S$  を 1 本見つけ、目的関数  $SC$  に代入し社会的費用を算出する。

リンクをカットする前と比べ、カットした後に社会的費用が減少するような ( $SC(S \setminus l) < SC(S)$ ) 場合は、 $S$  から  $l$  を除去したものを  $S$  と置き換えて、再び  $SC(S \setminus l)$  を最小化するリンク  $l$  を探索する。これを繰り返し行い、リンクを 1 本ずつカットしていく。リンクをカットする前と比べて、リンクをカットした後に社会的費用が増加するような ( $SC(S \setminus l) > SC(S)$ ) 場合は、計算を終了し、ネットワーク形状を表すリンク集合  $S$  が出力される。

## 4. 実際の移動需要データを用いた最適ネットワーク形状の導出

本章では、実際の需要データを用いた分析として、図 4 に表されるような日本全国を大まかに捉えた比較的大きなネットワークを対象として、都市間交通ネットワークとモバイル空間統計による観測された季節変動情報を用いた分析を行う。そして、現実のネットワークを用いて、最適形状の季節変動による差異とリニア新幹線などの交通条件の変化による影響を明らかにしていく。

本章では、モバイル空間統計データから得られる、対象となる都道府県の居住地ごとの滞在人口の時系列推移を用いる。対象とする期間は、新型コロナウイルスの影

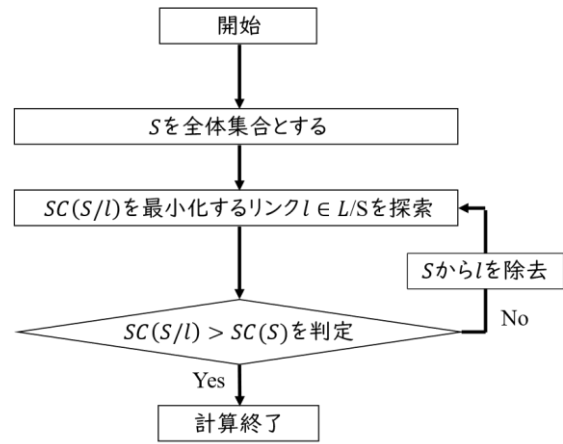


図 3 本研究で用いる貪欲法のフローチャート

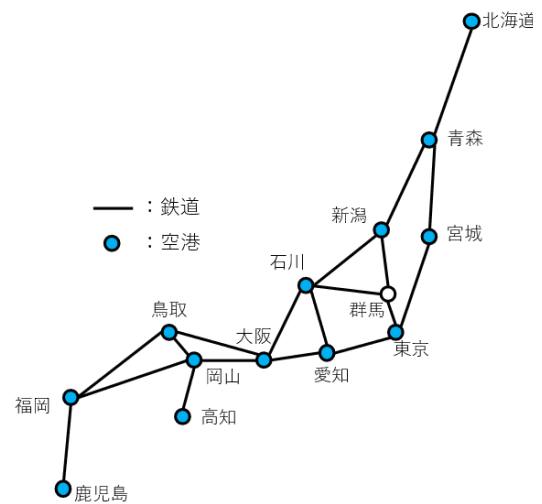


図 4 対象とする日本のネットワーク (14 ノード)

響や、天皇の即位の日による 10 連休などがなかった最新の 1 年間として、2018 年 3 月 1 日～2019 年 2 月 28 日の 365 時点である。

また本研究では、「季節変動がない場合の最適ネットワーク形状」と「季節変動がある場合の最適ネットワーク形状」を比較することで、季節変動が最適ネットワーク形状に与える影響を確認している。季節変動がない場合の分析では、OD 需要ごとに算出した対象期間の平均値を用いた。

各都道府県間の所要時間は、第 6 回全国旅客幹線純流動調査<sup>9)</sup>から得られる OD 別サービス水準データを用いた。このデータは、各都道府県庁間の所要時間を集計したものであるため、都道府県庁から駅や空港までに必要なアクセス・イグレス時間も含めた値であることに注意する必要がある。

さらに、本章では表 1 で示されるパラメータを用いて分析を行った。これは、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ためであり、正確な値ではない

ことに注意する必要がある。

本研究では、現実の都市間交通ネットワークを対象とした分析を行い、季節変動の有無が最適ネットワーク形状に与える影響を確認していく。日本の各地方にノードを1つずつ設定した、合計14ノードでの分析を3パターン行う。a)では、これまで通り鉄道と航空のネットワークの最適形状を導出する。b)では、鉄道ネットワークを所与とし、航空ネットワークの最適形状を導出する。これは、現実問題として都市間を結ぶ鉄道を廃止するほうがより抵抗が大きいと考えた設定であるとともに、次のc)の分析に向けたベンチマークの解析でもある。c)では、鉄道ネットワークを所与とした上で、現在建設中の新幹線が開業して特定都市間の所要時間が短縮された場合、航空ネットワークの最適形状がどのように変化するか、確認していく。また、本章では、MATLAB2022に貪欲法アルゴリズムを実装して分析を行っているため、厳密には最適解ではないが、ある一定の目的関数値が保証される。

さらに、本章の分析にかかる計算時間は10~15時間であり、47都道府県にノードを1つずつ置いた分析は計算負荷が大きく容易ではない。航空路線は、都市間の距離が400km以上となる98リンク(49リンク×往復分)リンクを設定可能とした。したがって、東京-石川のような現在運行されているような路線でも、設定範囲から除外している。さらに表1で示したパラメータを用いて、最適なネットワーク形状を導出していく。ここから、a)~c)の3パターンに分けて分析を行う。

a) 鉄道・航空における最適ネットワーク形状

ここでは鉄道と航空の最適なネットワーク形状を導出する。はじめに、季節変動がない場合の最適ネットワーク形状を図5に示す。図5では、鉄道(図5上)や航空(図5下)を運行することが最適であるリンクを黒の実線で結んでおり、鉄道を運行しないことが最適であるリンクをグレーの実線で結んでいる。

鉄道に注目すると、青森-宮城-東京と結ばれる東北新幹線、東京-愛知-大阪を結ぶ東海道新幹線、東京-群馬-新潟を結ぶ上越新幹線、大阪-岡山を結ぶ山陽新幹線の一部、福岡-鹿児島を結ぶ九州新幹線といった、新幹線が運行しているリンクに加えて、岡山-鳥取の山陽と山陰を結ぶリンクで鉄道を運行することが最適であることが読み取れる。その一方で、日本海側に位置するリンク(新潟-石川など)や、海峡部などのリンク(北海道-青森、岡山-福岡、岡山-高知)で鉄道を運行しないことが最適であることがわかる。前者のリンクは人口規模が小さいため当該リンクをODとする需要が少ないために、遠回りでもほかのODと併用するルートが最

表1 本研究で用いるパラメータ

	航空	鉄道
固定費用 $G_i$ (/日)	$3 \times \left( \frac{50}{180} t_{air} + 50 \right)$	$3 \times \left( \frac{375}{180} t_{rail} + 375 \right)$
変動費用 $E_i$ (/便)	$\frac{30}{180} t_{air} + 30$	$\frac{20}{180} t_{rail} + 20$
容量 $H_i$ (人/便)	200	1000
時間の金銭換算値 $T_i$ (/分)	$5.00 \times 10^3$	

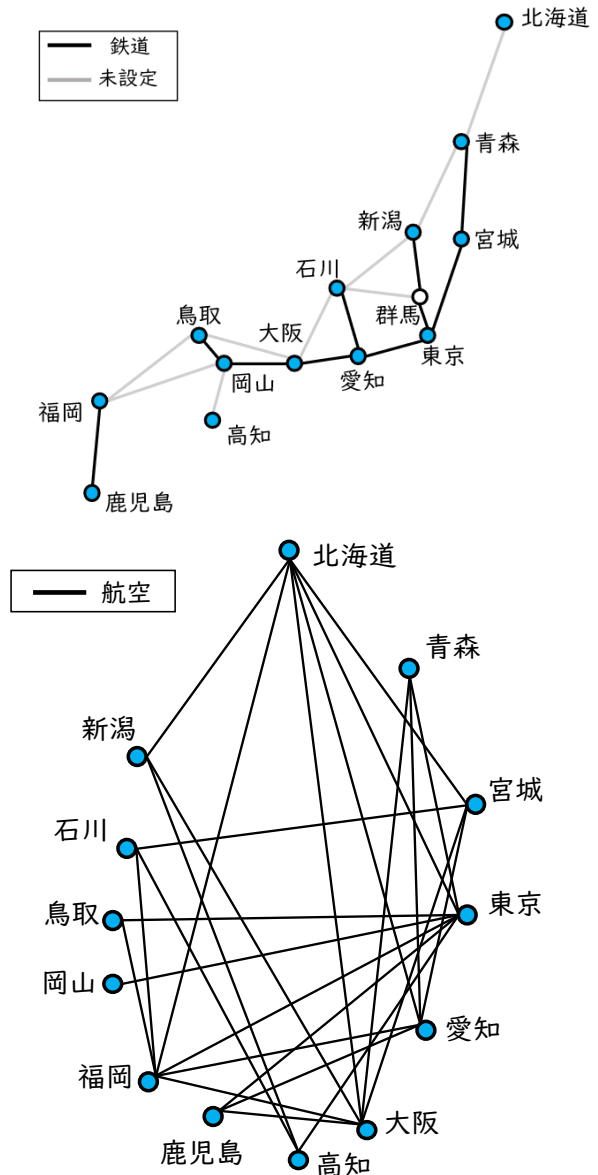


図5 季節変動がない場合における最適ネットワーク形状

適として選ばれているのであろう。

その代わりに、石川-高知などの地方都市間のリンクについては、より固定費用が小さい航空サービスが設定さ

れている。また、北海道や福岡のように人口規模が大き  
いにもかかわらず、周辺のリンク（北海道－青森、岡山  
－福岡）が途切れていることも特徴的である。これらの  
リンクは、所要時間が大きいことにより、膨大な量であ  
っても航空サービスを提供することが望ましいと判断され  
た原因だと考えられる。本研究では、固定費用は各交通  
モードの所要時間に比例する関数としているため、所要  
時間の大きいリンクでは膨大な固定費用を要すること  
が原因であろう。なお、九州のネットワークでも挙げた  
ように、本研究の分析では広島などの間の都市を無視し  
て計算していることも、このような結果となった原因で  
あることには注意が必要である。

航空に注目すると、北海道・東京・愛知・大阪・福岡  
の 5 つの主要空港に該当するノードからは、5 都市以上  
に運行されているが、このうち東京からは、運行されう  
る全ての都市（北海道、青森、鳥取、岡山、高知、福岡、  
鹿児島）に航空を運行している。そのうえで、宮城－石  
川や新潟－高知のように 5 つのノードを発着しないリン  
クでも運行されていることが読み取れる。

次に、季節変動がある場合の最適ネットワーク形状を  
導出した結果を図 6 に示す。季節変動がない場合と同様、  
鉄道や航空を運行することが最適なリンクを黒の実線で  
結んでいる。また、季節変動がない場合では運行しない  
ことが最適であるものの、季節変動がある場合に運行す  
ることが最適な鉄道リンクをオレンジの実線で結ぶ。逆  
に、季節変動がない場合では運行することが最適である  
ものの、季節変動がある場合に運行することが最適な航  
空リンクをグレーの点線で結ぶ。

鉄道に着目すると、季節変動がない場合には運行され  
ないことが最適であったリンクが複数あったものの、季  
節変動を考慮すると日本海側等も含む全てのリンクで、  
鉄道を運行することが最適である結果が得られた。一方、  
航空に着目すると、季節変動を加味しない結果と比較し  
て、青森－愛知、新潟－石川－高知、鳥取－福岡間で運  
行しないことが最適な結果となった。そして、北海道・  
東京・大阪・愛知・福岡の 5 都市を発着地に含む航空リ  
ンクしか運行されず、5 都市以外の都市間を結ぶ航空路  
線は運行されない結果になった。つまり、地方－地方な  
どを中心に、航空サービスでカバーすることが最適とし  
ていた旅行の多くが、季節変動を考慮するケースでは鉄  
道サービスでカバーすることが最適というになる。また、  
季節変動がない場合では鉄道だけで移動を完結できない  
OD ペアが多く存在したが、すべてのノードが鉄道で接  
続されたために「鉄道のみ」という選択肢をとれる OD  
ペアが増加した。これは例えば、東京から高知へ旅行す  
る際、旅行者は鉄道と航空から好きなモードを選択でき  
ることを意味する。季節変動を考慮しない 1 時点での分

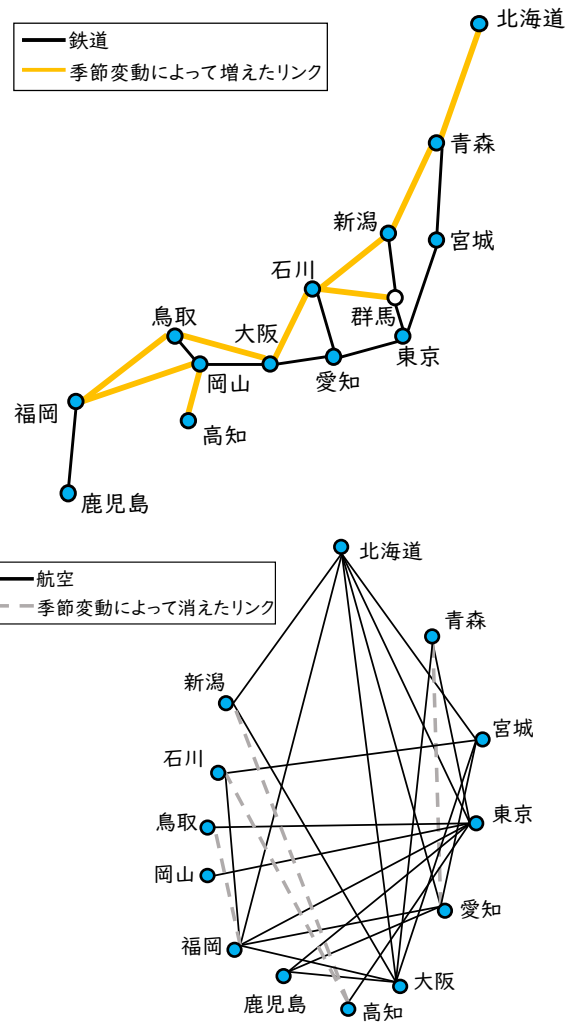


図 6 季節変動がある場合における最適ネットワーク形状

析では航空のみしか選択する余地がなかった。

以上のように、季節変動を考慮する最適ネットワーク  
形状では、鉄道リンクをより多く設定し、航空リンクを  
より少なく設定する方向であることがわかった。これは、  
藤田ら(2022)<sup>24</sup>の研究における、「1 日当たりの平均旅行  
者数が多く、鉄道と航空の所要時間差が大きい条件では、  
季節変動の有無によって、最適ネットワーク形状が「航  
空のみ」から「航空+鉄道」のように変化する」結果と  
整合的である。これらの結果から、季節変動を考慮せず  
にネットワーク設計を行うと、特に幹線部分を中心とし  
て鉄道ネットワークを維持する価値を過小評価してしま  
う可能性がある。

b) 鉄道ネットワークを所与とした場合の最適ネット  
ワーク形状導出結果

ここでは、鉄道ネットワークを図 4 で示した形状を所  
与としたケースの分析を行う。これは、都市間を結ぶ鉄  
道を廃線にすることは考えにくいと想定し、鉄道ネット

ワークを所与とし、その上で航空ネットワークの最適形状を導出した。

上記の条件のもと、季節変動がないパターンで航空の最適ネットワーク形状を導出すると、図7のようになる。鉄道ネットワークを所与としていない図5と比べて、青森-大阪、新潟・石川-高知で航空を運行しないことが最適となった(図7におけるグレーの点線)。これは図5では、岡山-高知の鉄道リンクで鉄道が運行しておらず飛び地となっている。このため、各地から高知へ向かう旅客は東京・新潟・石川を経由して、そこから航空で高知へ向かうことが最適となっていた。しかし図7のように鉄道ネットワークを所与とした場合、高知まで鉄道で移動することが可能となるので、各地から東京・新潟・石川を経由せず鉄道で高知へ向かうことが最適となる。また、新潟や石川と高知を OD とする需要も多くないため、このリンクで航空を運行しないことが最適となるのだろう。

次に、季節変動があるパターンで航空の最適ネットワーク形状を導出すると、図8のようになる。これは、鉄道を所与としない場合における結果(図6)と全く同じ結果である。鉄道を所与とし季節変動がない場合と比べて、青森-愛知、鳥取-福岡の航空が運行しないことが最適であり、青森-大阪の航空を運行することが最適となった。このことについて、青森-愛知・大阪を OD とする需要の季節変動を見ながら考察する。青森-愛知を OD とする需要を図9に、青森-大阪を OD とする需要を図10に示す。図9を見ると、愛知→青森の移動で大きな季節変動が存在していることが分かる。往復の1日当たりの平均旅行者数は526人だが、最大旅行者数は5,275人である。このため、季節変動を考慮しない場合では需要が少なく、航空を運行することが最適だった。しかし、季節変動を考慮すると、5,275人に対応したサービスを提供する必要があるため、容量の大きい鉄道を運行することが最適となるのだろう。次に図10から青森-大阪の需要の季節変動をみると、両方向で大きな季節変動があるものの、1日当たりの平均旅行者数は469人、最大旅行者数は1,818人であり、移動数は比較的小さい。また、季節変動がない状態(図7)において、青森-愛知の航空リンクを利用する旅行者の出発地を調べると、青森を出発地とする旅行者が多く存在することが確認された。つまり、図7の状態において、青森-大阪を OD とする旅行者は青森-愛知で航空を利用し、愛知-大阪で鉄道を利用していたのである。ただ、季節変動を考慮した場合、青森-大阪を OD とする最大旅行者数の1,818人を輸送するためのサービスを提供する必要がある。これは、鉄道を運行するには少ない値であるため、このリンクで航空を運行することが最適となったのだろう。

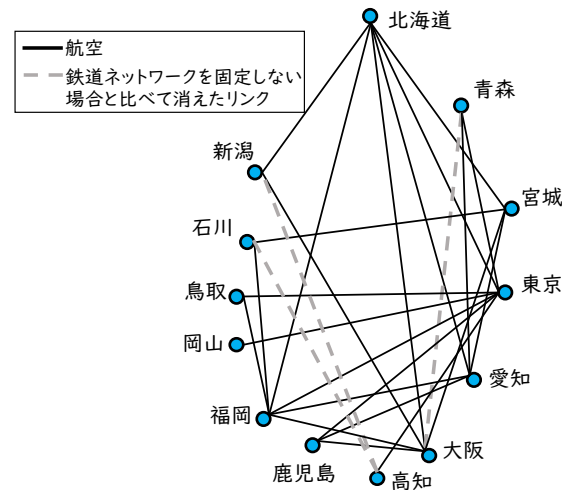


図7 季節変動がない場合における最適ネットワーク形状 (鉄道ネットワークは所与)

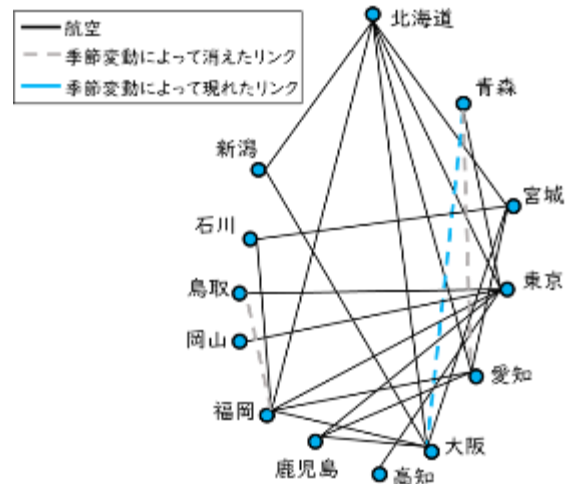


図8 季節変動がある場合における最適ネットワーク形状 (鉄道ネットワークは所与)

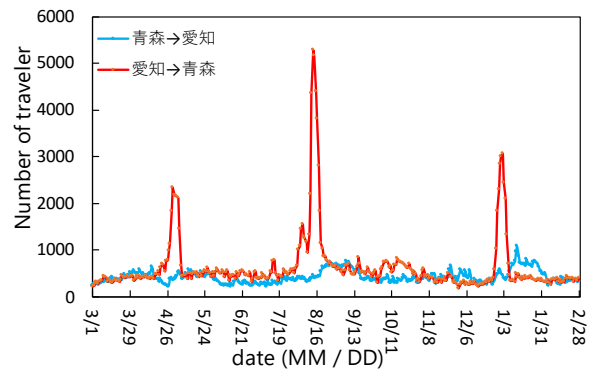


図9 青森-愛知における季節変動

c) 高速鉄道の開業が航空ネットワークの最適形状に与える影響

ここでは、現在建設中の新幹線が開業・延伸し、鉄道の所要時間が短縮したことを想定した分析を行う。2023年1月現在、中央新幹線（名古屋開業）・北陸新幹線（敦賀延伸）・北海道新幹線（札幌延伸）が建設中である。また将来的に、リニア新幹線と北陸新幹線は新大阪まで延伸される。これらの新幹線が開業・延伸することで、都市間旅行の移動時間が改善されることが期待されると同時に、航空も含めた日本の都市間ネットワーク形状に影響を及ぼすことが考えられる。そこでここでは、各新幹線が開業した場合を次の5つのパターンに分けて分析を行う。

- ① 中央新幹線が名古屋まで開業（東京－愛知が50分短縮）
- ② 中央新幹線が新大阪まで延伸（①に加えて、愛知－大阪が30分短縮）
- ③ 北陸新幹線が新大阪まで延伸（石川－大阪が70分短縮）
- ④ 北海道新幹線が札幌まで延伸（北海道－青森が170分短縮）
- ⑤ 上記がすべて開業した状態

また、b)で考えたように、鉄道ネットワークを所与とし、最適な航空ネットワーク形状を導出する。

① 中央新幹線が名古屋まで開業

ここでは、中央新幹線が開業し、東京－愛知における鉄道の所要時間が50分短縮した場合を想定した分析を行った。季節変動がない場合における最適な航空ネットワーク形状を図11に表す。これはb)で分析した、鉄道ネットワークを所与とした場合における、季節変動がないパターンで分析結果（図7）と変化が見られなかった。また、季節変動がある場合における最適な航空ネットワーク形状を図12に示すが、これもb)で示した、鉄道ネットワークを所与とした場合における、季節変動があるパターンで分析結果（図8）と変化が見られなかった。つまり、本分析の設定では、東京－名古屋までだけの開業では、最適なネットワーク形状は変わらないことを示す。

② 中央新幹線が新大阪まで延伸

ここでは、中央新幹線が新大阪まで延伸し、東京－愛知における鉄道の所要時間が50分短縮したことに加えて、愛知－大阪における鉄道の所要時間が30分短縮した場合を想定した分析を行った。季節変動がない場合に

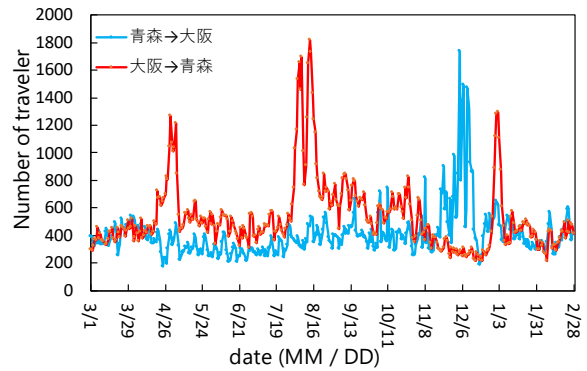


図10 青森－大阪における季節変動

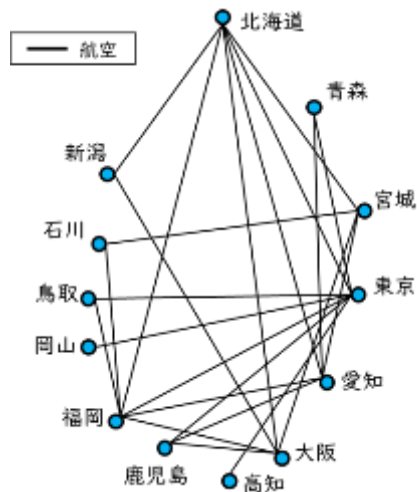


図11 季節変動がない場合の航空の最適ネットワーク形状（中央新幹線名古屋開業）

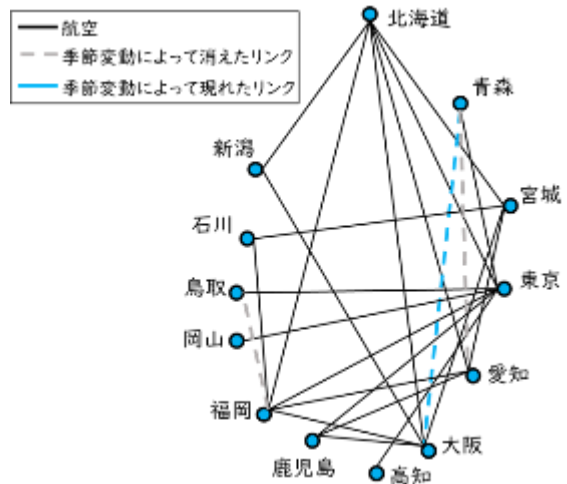


図12 季節変動がある場合の航空の最適ネットワーク形状（中央新幹線名古屋開業）

における最適な航空ネットワーク形状を図15に表す。これはb)で分析した、鉄道ネットワークを所与とした場合における、季節変動がないパターンで分析結果（図7）と変化が見られなかった。また、季節変動がある場合に

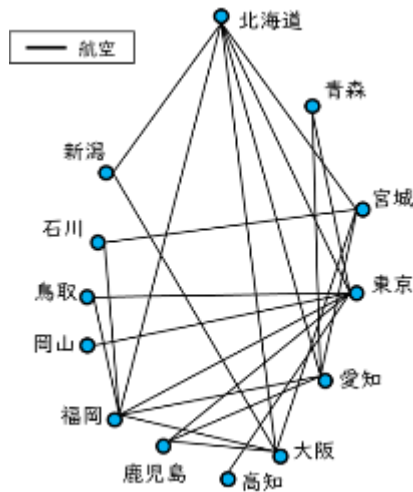


図 15 季節変動がない場合の航空の最適ネットワーク形状  
(中央新幹線新大阪延伸)

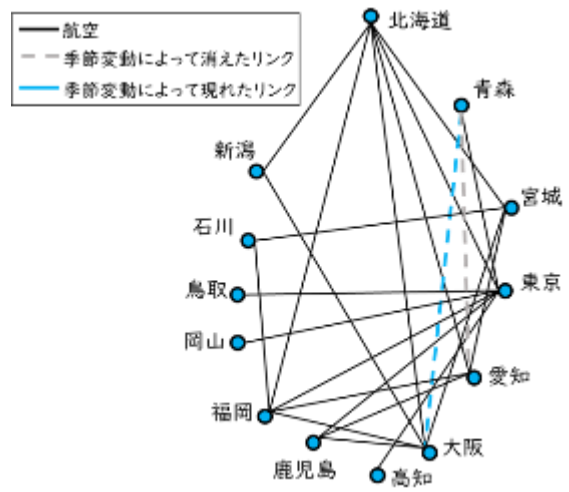


図 13 季節変動がある場合の航空の最適ネットワーク形状  
(北陸新幹線新大阪延伸)

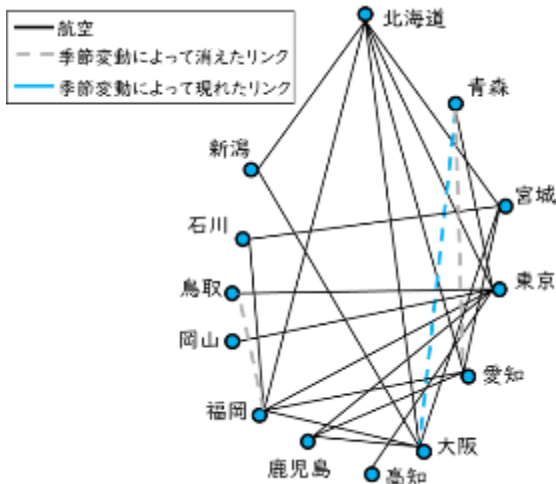


図 16 季節変動がある場合の航空の最適ネットワーク形状  
(中央新幹線新大阪延伸)

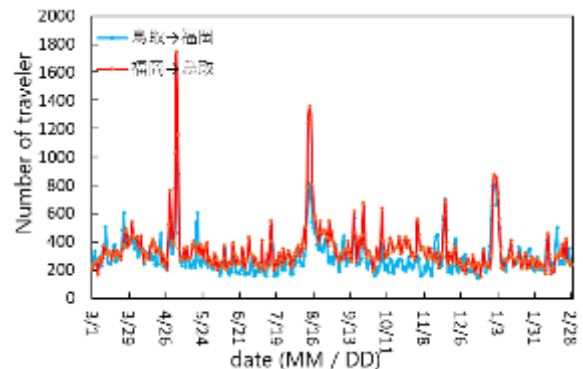


図 14 鳥取一福岡における季節変動

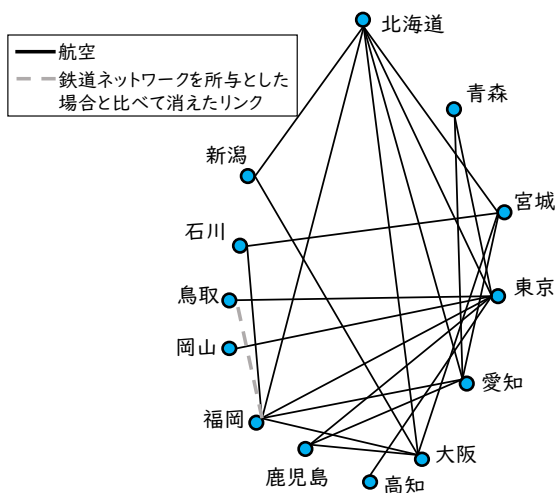


図 17 季節変動がない場合の航空の最適ネットワーク形状  
(北陸新幹線新大阪延伸)

における最適な航空ネットワーク形状を図 16 に示すが、これも b) で示した、鉄道ネットワークを所与とした場合における、季節変動があるパターンで分析結果 (図 8) と変化が見られなかった。つまり、本分析の設定では、中央リニア新幹線だけの開業では、最適なネットワーク形状は変わらないことを示す。

### ③ 北陸新幹線が新大阪まで延伸

ここでは北陸新幹線が新大阪まで延伸し、石川一大阪における鉄道の所要時間が 70 分短縮した場合を想定した分析を行った。季節変動がない場合における最適な航空ネットワーク形状を図 17 に表す。これは b) で分析した、鉄道ネットワークを所与とした場合における、季節変動がないパターンで分析結果 (図 7) と比べて、鳥取一福岡で航空を運行しないことが最適となった。ただし、この結果は、北陸新幹線が新大阪延伸したことは影響していないと考えられる。鳥取一福岡を OD とする需要を図 14 に表す。これは、1 日当たりの平均旅行者数が 320 人であり、青森一大阪と同程度の値である。しかし、こ

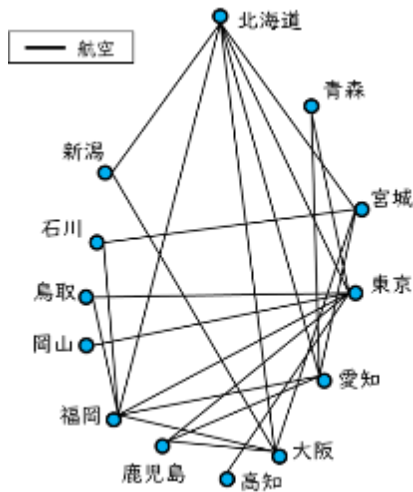


図 18 季節変動がない場合の航空の最適ネットワーク形状  
(北海道新幹線札幌延伸)

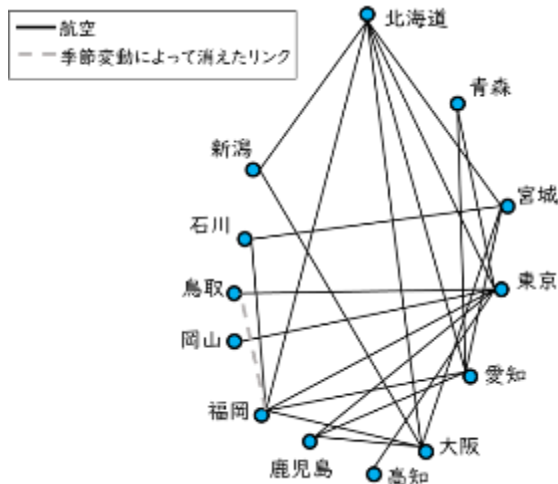


図 19 季節変動がある場合の航空の最適ネットワーク形状  
(北海道新幹線札幌延伸)

のリンクを利用する旅行者の出発地を確認すると、全ての旅行者の出発地が鳥取であるため、このリンクの利用者はこのリンクを OD とする旅行者のみであることが分かる。このような鉄道ネットワークを所与とした条件下において、OD 需要が少ないリンクでは鉄道の可変費用を払うのか、固定費用を払ってでも航空を運行するのか、境界線上にあるため、安定した結果が得られていないことが考えられる。また、季節変動がある場合における最適な航空ネットワーク形状を図 13 に示すが、これは b) で示した、鉄道ネットワークを所与とした場合における、季節変動があるパターンで分析結果 (図 8) と変化が見られなかった。

④ 北海道新幹線が札幌まで延伸

ここでは北海道新幹線が札幌まで延伸し、札幌—青森における鉄道の所要時間が 170 分短縮した場合を想定し

た分析を行った。季節変動がない場合における最適な航空ネットワーク形状を図 18 に表す。これは b) で分析した、鉄道ネットワークを所与とした場合における、季節変動がないパターンで分析結果 (図 7) と変化が見られなかった。また、季節変動がある場合における最適な航空ネットワーク形状を図 19 に示す。これも b) で示した、鉄道ネットワークを所与とした場合における、季節変動があるパターンで分析結果 (図 8) と比べて、鳥取—福岡で航空しなくなることは同様である一方、季節変動を考慮した場合でも青森—大阪の航空を新しく運行せず、かつ青森—愛知の航空は運行をする点に違いが見られる。これは、北海道—青森の所要時間が短縮したことによって、北海道—愛知を OD とする旅行者が青森—愛知の航空を利用するよう振り分けられているためだと考えられる。

⑤ 中央・北陸新幹線が新大阪まで、北海道新幹線が札幌まで開業

ここでは、①～④の条件を全て組み込んだ場合を考える。はじめに、鉄道ネットワークを所与とした、季節変動がない場合における最適な航空ネットワーク形状を図 20 に表す。これは b) で分析した、鉄道ネットワークを所与とした場合における、季節変動がないパターンで分析結果 (図 7) と比べて大きな変化が見られた。図 20 は図 7 と比較して、航空を運行しなくなったリンクをグレーの点線 (石川—福岡など)、航空を新たに運行するリンクを青い実線 (北海道—石川など) で表している。

図 523 では、新幹線の開業による所要時間短縮を考慮しない場合と比べて、青森—愛知、宮城—愛知・大阪、東京—岡山、石川—福岡、愛知—福岡・鹿児島、大阪—福岡・鹿児島、鳥取—福岡で航空を運行しないことが最適という結果が得られた。これは、複数の鉄道リンクの所要時間が短縮されたことにより、航空を運行するよりも容量の大きい鉄道を運行する方が、コストが小さくなるためだと考えられる。一方、北海道—石川、宮城—福岡、岡山—鹿児島で新たに航空を運行することが最適な結果が得られた。北海道—石川や宮城—福岡では、このリンクを OD とする旅行者が一定数存在し、さらに新幹線開業による所要時間短縮の恩恵が少ないため、航空運行することが最適となったと考えられる。一方、岡山—鹿児島では、新幹線開業による所要時間短縮の恩恵がない。また、鹿児島へ向かうには所要時間がかかるものの福岡経由で鉄道を利用するか、東京から航空を利用することになるため、鉄道の結节点的な役割を果たしている岡山から鹿児島まで航空を運行することが最適となるのだろう。

また、季節変動があるパターンで算出した結果を図

21に示す. なお, この図は, 図8との比較で色分けしている. 図21では, 青森-東京・大阪, 宮城-愛知・大阪, 東京-鳥取・岡山, 愛知-福岡・鹿児島, 大阪-福岡・鹿児島で運行しないことが最適となること分かる. これは上記と同様に, 複数の鉄道リンクの所要時間が短縮されたことにより, 航空を運行するよりも容量の大きい鉄道を運行する方が, コストが小さくなるためだと考えられる. また, 東京においても季節変動がない場合(図7)と比較して3リンク減少することが分かる. これはTakebayashi(2022)<sup>13)</sup>で議論されているような, 国内空港, 特に羽田空港のキャパシティーに対する問題を解決する糸口になる可能性があることを示唆している.

そして, 図22は, 図21と同じ結果であるが, 色分けを季節変動がないと仮定したときの結果(図5.23)との比較に変更している. 図20と比べると北海道-石川, 青森-東京, 宮城-福岡, 東京-鳥取の航空を運行しないことが最適だと読み取れる. 青森や鳥取では, 鉄道リンクのみで接続され, 航空リンクが1リンクも運行されないことが特徴的である. これはつまり, 現在建設中の新幹線が整備された際, 鳥取や青森の地方空港の重要性がかなり低下する可能性を示している.

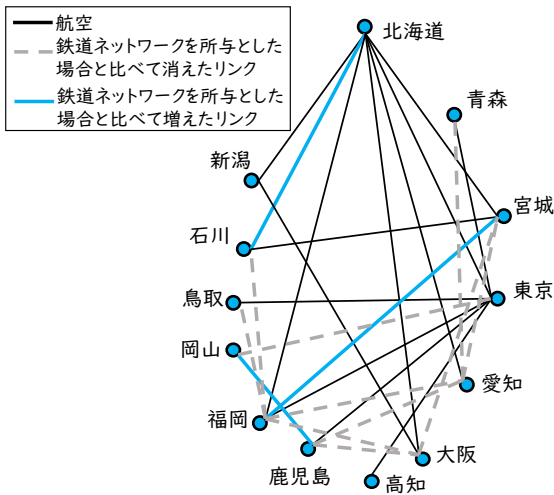


図20 季節変動がない場合の航空の最適ネットワーク形状 (全ての新幹線が開業)

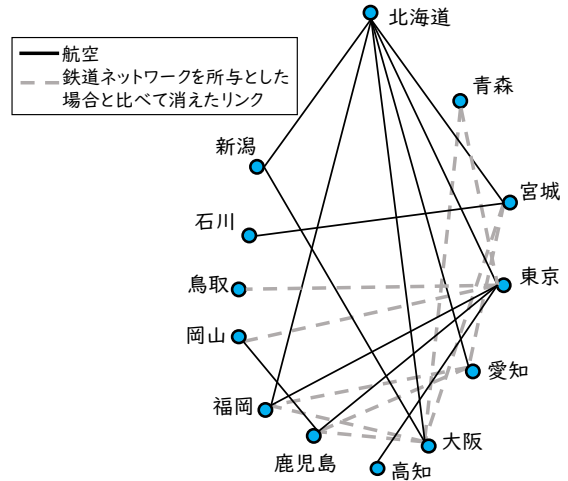


図21 季節変動がある場合の航空の最適ネットワーク形状 (全ての新幹線が開業)

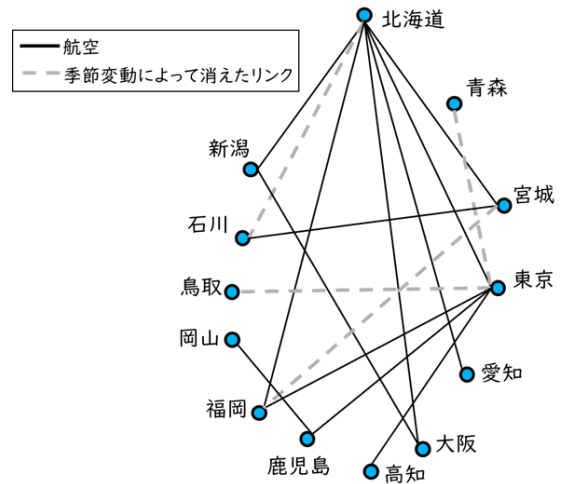


図22 季節変動がある場合の航空の最適ネットワーク形状② (全ての新幹線が開業)

## 5. おわりに

本研究では, 旅行需要の季節変動の大きさが最適マルチモーダル旅客交通ネットワーク形状にどのような影響を及ぼすかを把握するために, 複数時点の需要を考慮することが可能な最適マルチモーダルネットワーク形状を導出するモデルの提案を行った. この方法は, 複数時点の需要量を組み込むことで長距離交通の需要変動を考慮した点に特徴があり, 従来の交通量調査・モデルでは十分に観測・考慮されてこなかった, 季節変動性を考慮した最適ネットワーク形状の評価が可能となる.

そして, モバイル空間統計から得られる実データと. 日本全国を大まかに捉えたネットワークを用いて, 季節変動の有無が最適ネットワーク形状に与える影響を分析し, 次の2点を明らかにした. 一つ目は, 季節変動を考

慮しなかった（既往研究で考えられてきた）ケースでは、鉄道路線が途切れたネットワークを形成し、航空でしか行くことができないノードが存在した一方、季節変動を考慮したケースでは、より多くの鉄道が必要となることである（図 5, 図 6）。これは、1 時点で分析されていた既往研究では鉄道ネットワークを維持する価値を過小評価していた可能性がある。例えば、鉄道会社の多くは、鉄道の存廃における議論の出発点を平均輸送人員の低下を根拠にしているが、季節変動を考慮すると優先して存廃の議論を開始する路線が変わってくる可能性がある。二つ目は、複数の OD ペアに利用されるわけではないリンクは、比較的、季節変動を考慮した上でも鉄道を運行しないことが最適となる傾向にある。

最後に、日本で現在建設中の新幹線（リニア・北陸・北海道新幹線）が開業したことを想定して、鉄道の所要時間を短縮した分析を行った。各新幹線一つ一つが開業したことを想定した分析では、航空の最適ネットワーク形状は大きく変化しなかった一方、全ての新幹線が開業したことを想定した分析では、航空の最適ネットワーク形状が大きく変化することを確認した。本研究の結果では、現在建設中の新幹線が整備された際、鳥取や青森の地方空港の重要性がかなり低下する可能性があることを明らかにした。

最後に、本研究を行って生じた課題や展望について述べていく。はじめに、本研究で扱ったパラメータは正確な値ではない。4 章で述べたように、分析結果において、ネットワーク形状の変化がよく見られる値を選択しており、実際に観測された値でないことに注意する必要がある。

また今回の分析では、計算負荷を軽減する観点から、各地方を代表する都道府県を選出して分析を行っている。そのため日本の全ての OD を考慮できていないことに注意する必要がある。鉄道路線の大きな特徴として、複数の OD ペアの需要をカバーする点が挙げられる。本研究のモデルでは、鉄道の莫大な固定費用を一つの OD ペアの利用者だけで支払っているが、例えば東海道新幹線の東京―名古屋間には、東京都と愛知県の他に神奈川県と静岡県が存在するが、これら 2 県を OD に含む需要を考慮した分析は行うことができておらず、多数の OD 需要を無視している。東海道新幹線は東京―名古屋の利用者だけでなく、品川―静岡、新横浜―名古屋といった、沿線の様々な組み合わせの利用者が共同で固定費用を支払っている。しかし、本研究ではその部分を考慮できていない。したがって本研究では、山陽新幹線の岡山―福岡リンクにおいて、人口規模が大きい広島県を OD とする需要を無視したため、鉄道が不要になるという、直感とずれた結果が導出された（図 5）。この課題を解決する

ため、計算にかかる時間に対する工夫が必要となるが、より詳細な分析を行う際は、より細かくノードを設定し分析を行うこと必要である。具体的には、全ての都道府県にノードを設定することだけでなく、鉄道ノードと空港ノードを分けて設定し、空港から鉄道駅へのアクセス・イグレス時間を考慮することが望ましいだろう。

さらに本研究では、複数時点の需要を考慮することが可能な最適マルチモーダルネットワーク形状を導出するモデルの提案を行い、仮想需要や実データを用いて分析を行ったが、まだまだ活用の余地があると考えられる。

以上の課題を解決し、本研究が我が国のマルチモーダルなネットワークを検討する際の参考情報になることを期待する。

**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) 荒谷太郎, 轟朝幸: わが国の都市間公共交通モビリティに関する時系列分析, 土木計画学研究・論文集, Vol.27, no.4, pp643-652, 2010
- 2) 総務省統計局, 人口減少社会, 少子高齢化
- 3) 国土交通省, 近年廃止された鉄軌道路線
- 4) 西日本旅客鉄道, ローカル線に関する課題認識と情報開示について
- 5) 橋本安男, 屋井鉄雄, 伊東誠: 地方航空路線の撤退要因と維持・拡充に係る研究, 運輸政策研究 17 巻 3 号, I\_002-I\_014, 2014
- 6) 国土交通省, 全国旅客純流動調査集計データファイル
- 7) 奥村誠・山口裕通・大窪和明: 全国幹線旅客純流動調査の鉄道サンプル拡大方法に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol67, No5 (土木計画学研究・論文集第 28 巻), pp.911-918, 2011
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) Jiang, C., & Zhang, A. (2016). Airline network choice and market coverage under high-speed rail competition. *Transportation Research Part A*, 92, 248-260
- 12) 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
- 13) Takebayashi, M. & Yamaguchi, H. (2022). Managing a multiple-gateway airport system with super high-speed rail. *Journal of Air Transport Management*, 99
  - 14) 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
  - 15) 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
  - 16) Huseyin Tirtom , 山口裕通, 奥村誠, 金進英: 低炭素化政策が都市間旅客交通ネットワークの構造に与える影響, *土木学会論文集 D3*, Vol.70, No.5, pp.819-827, 2014.
  - 17) 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, (土木計画学研究・論文集第 35 巻), pp.779-786, 2018
  - 18) 波床正敏・中川大: 高速鉄道網の最適化試算結果に基づく国鉄解体後の幹線鉄道政策に関する事後考察, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.71, No.5, (土木計画学研究・論文集第 32 巻), pp.629-641, 2015.
  - 19) 渡邊拓也・柴田宗典・鈴木崇正: 多目的最適化に基づく都市間交通ネットワークの評価手法に関する研究, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.72, No.5, (土木計画学研究・論文集第 33 巻), pp.903-916, 2016.
  - 20) Kawasaki, A. (2008). Network effects, heterogeneous time value and network formulation in the airline market, *Regional Science and Urban Economics*, 38, 388-403
  - 21) 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
  - 22) Terada, M., Nagata, T. & Kobayashi, (2013). M., Population Estimation Technology for Mobile Spatial Statistics, *NTT docomo Technical Journal*, 14
  - 23) 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
  - 24) 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
  - 25) 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, 2012
  - 26) 吉伸, 永野清仁: 劣モジュラ最適化と機械学習, pp.1-92, 講談社, 2015.

(?????.??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 shape of the intercity transportation network using OD demand data at multiple points in time. Concretely, a 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. As a result, it was found that the optimal network shape changes depending on the presence or absence of seasonal variations in the analysis using a network that roughly captures Japan. In particular, we were able to show that the one-point analysis used in previous studies may have underestimated the value of maintaining the railroad network.