

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2022

課題番号：16K16356

研究課題名(和文)公共交通の時空間ネットワークと最適化

研究課題名(英文)Time-Space Network Design and Optimization in Public Transport

研究代表者

高松 瑞代(TAKAMATSU, Mizuyo)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：70580059

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、最適化理論を用いた公共交通の設計である。時刻表は時空間ネットワークとよばれる大規模なネットワークで表すことができ、時間に依存した乗客の動きは時空間ネットワーク上のフローとして精確に表現できる。本研究では、時空間ネットワークを利用することで、岩手県、静岡県、高知県、東京都を対象として、対象地域の特徴に合わせた時刻表設計や路線計画の数理モデルをそれぞれ提案した。実際の時刻表から大規模な時空間ネットワークを作成し、数値実験により提案モデルの有効性を示した。さらに、鉄道利用に着目して購買データの分析を行い、交通分野とマーケティング分野の横断型の研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、時空間ネットワークと最適化理論を融合することで、鉄道・バスの路線や時刻表の利便性をさらに高めることを目指している。対象地域の実際の時刻表データから時空間ネットワークを構築して大規模な数値実験を行い、対象地域の路線や時刻表を詳細に分析して改善すべき点を明らかにし、最適化手法を用いてより利便性の高い路線や時刻表を設計するモデルを提案した。最適化モデルでは、時空間ネットワークをはじめとする数理モデルを用いることで不便さの度合いや改善の度合いを定量化し、それらに基づいて目的関数を定めた。また、駅構内売店の購買行動分析を行い、交通分野とマーケティング分野をつなぐデータ分析の有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to design public transport by utilizing optimization techniques. The time-space network represents timetables of trains/buses and behavior of passengers. We can express the time-dependent behavior of each passenger by computing flows in the time-space network. We have proposed several mathematical models for timetable design and line planning by using the time-space network. The target areas are Iwate, Shizuoka, Kochi, and Tokyo. We have demonstrated the utility of our models by numerical experiments with the large-scale time-space networks. We have also presented a mathematical model to estimate the number of customers stopping by a kiosk by analyzing purchase behavior of train commuters at kiosks in stations.

研究分野：数理情報学

キーワード：最適化 公共交通 時刻表設計 時空間ネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

本研究の目的は、最適化理論を用いた公共交通の設計である。欧米では鉄道最適化という分野が盛んに研究されており、ドイツやオランダでは最適化手法を用いて作成された時刻表が実際に利用されている。鉄道の運行計画・運行管理をテーマとした国際会議も開催されており、実データを用いた事例研究が数多く発表されている。

鉄道最適化分野の発展は、1989年に Serafini and Ukovich が時刻表作成問題を簡潔な数理最適化問題として記述したことがきっかけである。近年の最適化ソルバーの発展とともに扱える制約条件は飛躍的に増え、現在では非常に大規模な問題まで解けるようになっており、現実社会への適用を重視した研究が進められている。欧米での鉄道最適化の発展は最適化理論の発展の流れに沿ったものであり、最適化理論やネットワーク理論の最新の研究成果が数多く利用されている。

鉄道最適化の多くの研究の軸となっているのは、時刻表をネットワークで表している点である。日本では、実際の時刻表をネットワークで表した時空間ネットワークを用いた研究が行われてきた[田口(2005)]。時空間ネットワークには電車(バス)の走行・駅(バス停)での停車、旅客の乗換行動・駅(バス停)で待つ行動を表す枝が定義されている。時刻表のデータをネットワーク構造で表現しただけでなく、旅客の可能な行動を網羅できるような枝を用意することで、時間に依存した旅客の動きを時空間ネットワーク上のフローとして精確に表現することが可能である。日本におけるこれまでの研究は、与えられた時刻表に対して旅客流動シミュレーションを行い、電車の混雑や遅延といった定性的な問題を定量的に議論するものが主であった。既存研究で利用されてきた時空間ネットワークや旅客流動シミュレーションを最適化手法と融合することで、利便性の高い鉄道・バスの路線および時刻表が設計できると期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では時空間ネットワークと最適化手法を融合することで、鉄道・バスの路線および時刻表の設計を行う。さらに、鉄道利用と購買行動の関係に着目し、交通分野とマーケティング分野の横断型の研究を行うことを目指す。

本研究の一つめのテーマは、最適化手法を用いた公共交通の設計である。時空間ネットワークは路線ネットワークに比べて規模が格段に大きくなるため、時空間ネットワーク上の最適化問題は計算が困難であった。近年、最適化技術および最適化ソルバーのめざましい発展により、大規模な最適化問題も実用的な計算時間で解けるようになってきている。時刻表設計や路線計画を時空間ネットワーク上の最適化問題ととらえ、最新の最適化理論やネットワーク理論を駆使して時刻表および路線の設計を行う。

最近の交通系 IC カードには電子マネー機能が備わっており、多くの駅構内店舗で利用可能である。これらの IC カードから鉄道利用と関連づけられる POS データが得られるため、交通分野とマーケティング分野をつなぐデータ分析が可能になっている。本研究の二つめのテーマでは鉄道利用者を対象として購買行動分析を行い、時空間ネットワークの新たな応用を開拓する。

## 3. 研究の方法

公共交通の設計で重視すべき点は、地域や時間帯によって大きく異なる。例えば、都市部と地方では鉄道・バスの運行本数や乗換の実態などが異なり、通勤時間帯と平日の昼間では公共交通の利用目的が変わってくる。本研究では、対象地域において住民が公共交通に何を望んでいるかを分析し、住民にとって便利な時刻表の設計を目指す。

時空間ネットワークを用いると、出発時刻や乗換待ち時間、電車一本一本の混雑率など、人の移動に関する詳細な情報を計算することができる。まずは、対象地域の現行時刻表に基づいて大規模な時空間ネットワークを構築し、現状の分析を行う。分析結果に基づいて時刻表設計や路線計画の最適化モデルを作成し、より利便性の高い時刻表や路線を求める。

## 4. 研究成果

最適化手法を用いた公共交通の設計では、バスの時刻表および路線の設計に取り組み、静岡県、岩手県、高知県を対象としてそれぞれの地域の特徴に合わせてモデルを提案した。さらに、東京首都圏を対象として、鉄道の優等列車停車駅の最適化を行った。具体的な内容は以下のとおりである。

### (1) 交通状況による遅延を考慮したバス時刻表の設計

静岡県富士市のバス路線を対象として、乗換の円滑さと遅延に対する強さを備えたバス時刻表を設計した。路線バスは渋滞などの影響を受けやすく、遅延が発生しやすい。また、一度発生した遅延は交通網全体に広がり、大勢の利用者が遅延の影響を受けることがある。実際の公共交通ネットワークでは、複数のバス路線や鉄道路線が複雑に結びついている。電車とバスやバス同士の円滑な乗換を保証するためには、ネットワーク全体を考えた上で、運行時間に余裕をもたせ

るバス停間を適切に選ぶ必要がある。本研究では富士市の現地調査とデータ分析の結果に基づき遅延シナリオを作成し、最適化手法を用いて各バスの発着時刻を決定した。

#### (2) 低頻度公共交通地域における円滑な乗換を保証するバス時刻表設計

交通需要が少ない地域では、低頻度で運転されている公共交通機関（鉄道・バス）の利用促進が大きな課題である。現状では、乗換の待ち時間が長いことが住民の利用を遠ざける原因となっている。住民の快適な移動のためには、鉄道とバスの接続のよい時刻表設計が不可欠である。

本研究では、実際に運用可能な時刻表の設計を目指し、バスの本数は変更せず、バスの運行順序はできる限り現状を維持したまま、バスの発着時刻をずらすことで鉄道とバスの円滑な乗換を保証する数理計画モデルを提案した。この数理計画モデルを岩手県に適用し、得られた時刻表により移動利便性が向上することを示した。

#### (3) 時間依存交通流に基づくバス路線・バス時刻表の設計

日本の過疎地域では人口減少により公共交通の利用者数が減り、路線バスの縮小や廃止が相次いでいる。一日のバス運行本数が少ない地域では、住民が何時にどこへ移動するかというデータを利用して、住民の移動利便性を高めるようにバスが通る経路と時刻を設計することが重要である。本研究では、時間に依存する交通量に基づいてバスの路線および時刻表を設計する手法を提案した。岩手県大槌町を対象として実験を行い、提案手法の有用性を示した。

#### (4) ネットワークの連結性に着目したバス路線の設計

公共交通の大きな役割のひとつは、生活の拠点となる場所を結び、多くの住民が便利に移動できるサービスを提供することである。運行頻度の高い公共交通サービスを提供する余裕がない地域では、拠点となる場所を結ぶものの中でコストの小さい路線を適切に選ぶことが重要になる。シュタイナー連結性問題は、このような問題意識から導入された問題である。本研究では、高知県のバス路線に対してシュタイナー連結性問題によるモデル化を行い、数値実験を行った。実験結果に基づき、高知県の拠点間を連結にするという観点からバス路線を考察した。

#### (5) 首都圏における優等列車停車駅の最適化

東京首都圏では通勤時間帯の列車が非常に混雑しており、鉄道会社は混雑緩和を目指してさまざまな取り組みを行っている。通勤時間帯の乗客は、移動時間と電車の混雑率を勘案して乗るべき電車を選択する。混雑の影響を受ける乗客の経路は、利用者均衡配分モデルを用いて計算することができる。本研究では、利用者均衡配分問題を繰り返し解く局所探索法により、優等列車停車駅の最適化を行った。6つの列車種別を持つ京王線に対して数値実験を行い、提案手法の性能を評価した。

鉄道利用と購買行動の関係に着目した研究成果は以下のとおりである。

#### (6) 通勤時間帯における購買行動の数理モデル

本研究では通勤時間帯に焦点を当て、駅利用者が駅構内店舗に立ち寄る行動を数理的に分析した。利用者の性別、店舗の面積や品揃えによって購買行動が異なることをデータから導き、複数店舗の立ち寄り率を店舗内混雑という一つの指標によって説明した。さらに、15分ごとの駅利用者数のデータを入力として、属性別の店舗利用者数を推定する数理モデルを構築した。

本研究では、交通系ICカードによる出改札記録に基づいて駅利用者数を算出した。一方、出改札記録がない場合であっても、時空間ネットワーク上で利用者均衡配分問題を解くことで、乗換客も含めた駅利用者数を推定することができる。本研究で提案した購買行動モデルを時空間ネットワークと組み合わせることで、駅構内の新規出店計画に役立つモデルへ発展していくことが期待される。

その他、本研究テーマで培った応用の視点に基づき、以下の2冊の本を出版した。

- ・ 高松 瑞代 『応用がみえる線形代数』 岩波書店、2020。
- ・ R. セジウィック（著）、田口東、高松瑞代、高澤兼二郎（訳）『セジウィック：アルゴリズムC 第5部 グラフアルゴリズム』 近代科学社、2021。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamauchi Tatsuki, Takamatsu Mizuyo and Imahori Shinji	4. 巻 15
2. 論文標題 Optimizing train stopping patterns for congestion management	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Public Transport	6. 最初と最後の頁 1-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12469-021-00286-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mizuyo Takamatsu and Azuma Taguchi	4. 巻 54
2. 論文標題 Bus timetable design to ensure smooth transfers in areas with low-frequency public transportation services	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transportation Science	6. 最初と最後の頁 1238-1250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1287/trsc.2019.0918	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 田中健裕, 高松瑞代, 菅原宏明, 田口 東	4. 巻 52
2. 論文標題 交通状況による遅延を考慮し円滑な乗換を保证するバス時刻表の設計	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 都市計画論文集	6. 最初と最後の頁 1320-1326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11361/journalcpj.52.1320	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 田口東, 高松瑞代	4. 巻 27
2. 論文標題 通勤時間帯の駅構内における購買行動の数理モデル	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本応用数理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 147-161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11540/jsiamt.27.2_147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 荒川兼次, 高松瑞代, 田口東, 石井儀光, 赤星健太郎
2. 発表標題 つながる高知県路線バスネットワークの設計: シュタイナー連結性問題によるモデル化と実験的考察
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Yamauchi, M. Takamatsu and S. Imahori
2. 発表標題 Optimizing train stopping patterns for congestion management
3. 学会等名 The 23rd International Symposium on Mathematical Programming (ISMP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山内達貴, 高松瑞代, 今堀慎治
2. 発表標題 利用者均衡配分に基づく時間帯別列車運行計画の最適化
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小田元, 高松瑞代, 田口東
2. 発表標題 過疎地域における時間依存交通流に基づく公共交通の設計
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Yamauchi, M. Takamatsu and S. Imahori
2. 発表標題 Optimizing train stopping patterns for congestion management
3. 学会等名 The 17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems (ATMOS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山内達貴, 高松瑞代, 今堀慎治
2. 発表標題 利用者均衡配分に基づく優等列車停車駅の最適化
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2017年秋季研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中健裕, 高松瑞代, 菅原宏明, 田口東
2. 発表標題 遅延に頑健な路線バスの時刻表設計
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2017年春季研究発表会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 R. セジウィック, 田口東, 高松瑞代, 高澤兼二郎	4. 発行年 2021年
2. 出版社 近代科学社	5. 総ページ数 400
3. 書名 セジウィック : アルゴリズムC 第5部	

1. 著者名 高松 瑞代	4. 発行年 2020年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 222
3. 書名 応用がみえる線形代数	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------