

経路検索行動と鉄道利用行動の関係性分析

細江 美欧¹・桑野 将司²・森山 卓³

¹学生会員 鳥取大学 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)

E-mail: mhosoec@tottori-u.ac.jp

²正会員 鳥取大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)

E-mail: kuwano@tottori-u.ac.jp

³正会員 鳥取大学助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)

E-mail: moriyama@tottori-u.ac.jp

経路検索システムの検索履歴データは、地方部でも入手可能性が高く、公共交通需要予測のための情報源として期待が高い。ただし、このシステムは普段とは異なる経路や時間帯での移動の際に利用されるとい特徴から、経路検索データで予測可能なのは非定期的な公共交通需要と考えられる。本研究では非定期的な経路検索行動と非定期的な公共交通利用行動に着目し、両者の関係性を明らかにすることを目的とする。そのために、香川県で運行される鉄道路線「ことでん」を分析対象として、日変動する経路検索数と鉄道利用者数から、2 変量状態空間モデルを用いて非定期的経路検索数と非定期的鉄道利用者数を抽出した。そして、抽出した非定期的な成分に回帰分析を適用し、非定期的経路検索数と非定期的鉄道利用者数の間に正の相関があることを示した。

Key Words: route-search system, smart card, public transport, provincial city

1. 序論

スマートフォンや PC の普及とともに IoT が進展し、我々の暮らしに必要な移動やそれを支える移動手段が進化しつつある。鉄道やバスなどの公共交通に加え、自動車や自転車のシェアリングサービス、AI を活用したデマンド交通や自動運転などが世界中で導入されている。そのような中で、交通分野では MaaS (Mobility as a Service) への注目が高まっている。

MaaS は持続可能な生活ができる地域を実現するために、移動に関するサービスを組み合わせ、個人のニーズに合わせた移動サービスを提案しようとする概念である¹⁾。MaaS の実現には公共交通だけでなく、タクシー、カーシェア、自転車シェアなどあらゆる移動手段を連携させ、ドア to ドアの移動ができるサービスの提供が求められる。

香川県高松市では scheme verge 株式会社やことでんグループを中心に高松 MaaS 導入に向けた取り組みが活発である。高松市ではことでんグループが運営する高松琴平電気鉄道 (以降、ことでん) やことでんバスが公共交通の基幹的役割を担っており、そのネットワークは高松都市圏に広がっている。さらに、高松市が独自で運営している、放置自転車を活用したレンタサイクルが市民の

移動手段として定着しており、MaaS の素地ある先進都市として注目度が高い。2020 年度には地域課題解決に資する MaaS のモデル構築を図る「日本版 MaaS 推進・支援事業」の対象地域に選出された。そして、実証実験²⁾の結果をもとに地域経済への影響や制度的課題を整理し、ビジネス環境整備が進められている。

地方部において、限られた予算で効率的にマルチモーダルな移動サービスを提供するためには、交通需要の変容を予測し、需要に合った供給を行うことが必要である。しかし、地方都市ではデータ収集可能なシステムがそもそも導入されていないことやデータの秘匿性から、交通需要予測のために活用できる行動データが限られている。そのような中で、新たな行動データとして、経路検索システムの検索履歴データ (以降、経路検索データ) が着目されている。

経路検索システムとは出発地や目的地、公共交通を利用したい日時を入力することで、最適な経路や運賃などを検索できる Web サービスである。このシステムは郊外部や中山間地域でも加速的に導入が進んでいるため、経路検索データは場所を問わず入手が容易になっている。蓄積される経路検索データには検索者の将来の移動希望が反映されており、公共交通の需要を予測するための情報源となる可能性がある。しかし、経路検索システムは

(2) 使用データの概要

本研究では経路検索行動と鉄道利用行動の関係を明らかにするために、経路検索データと乗降履歴データを用いる。データの概要を以下に示す。

a) 「NAVITIME」の経路検索データ

本研究では、経路検索システム「NAVITIME」を用いて、起終点にことでの駅を指定し、利用指定日を2014年1月1日からの12ヶ月間内とした検索履歴データを用いる。収集されたデータ数は234,615件であり、このうち、1) 検索した日が利用指定日以前であり、2) ことでんが運行する便に該当する検索で、3) 同一起終点を検索していない195,448件を有効データとして用いる。

図-2に2014年における日別の経路検索数の推移を示す。1日あたりの平均経路検索数は約535件であり、最も経路検索数が多かったのは8月13日の1,503件、最も経路検索数が少なかったのは10月13日の188件であった。

図-3には曜日別の平均経路検索数を示す。曜日別の平均経路検索数は月曜日から木曜日にかけて減少し、木曜日に最も少ない。そして、金曜日と土曜日に増加し、土

曜日に最も多いが、日曜日に減少する。また、週末の金曜日から日曜日の平均経路検索数が他の平日よりも多いことがわかる。さらに、図-4の経路検索数のコレログラムからは、7日の周期で強い自己相関があるとわかり、経路検索数には曜日による周期性の存在が示唆された。

b) 「IruCa」の乗降履歴データ

本研究では、ことでんに導入されている交通系ICカード「IruCa」の乗降履歴データを用いる。データの収集期間は経路検索データと同様に2014年1月1日からの12ヶ月間であり、この期間に収集されたデータ数は7,285,256件である。このうち、1) ことでんの運行時間帯(5時台から24時台まで)に利用され、2) 移動所要時間が60秒以上であった7,265,029件を有効データとして用いる。

図-5に2014年における日別のカード利用数を示す。1日あたりの平均カード利用数は約19,904件であり、最もカード利用数が多かったのは4月18日の28,378件、最もカード利用数が少なかったのは10月13日の1,623件であった。カード利用数が最も少なかった日は経路検索数の最少日と一致する。

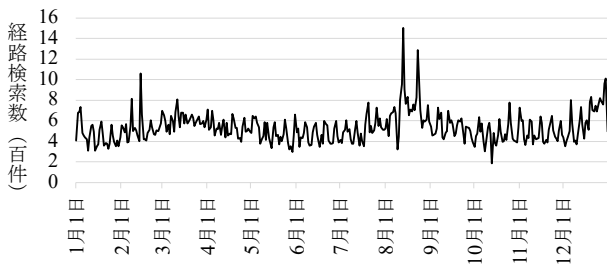


図-2 日別経路検索数の推移

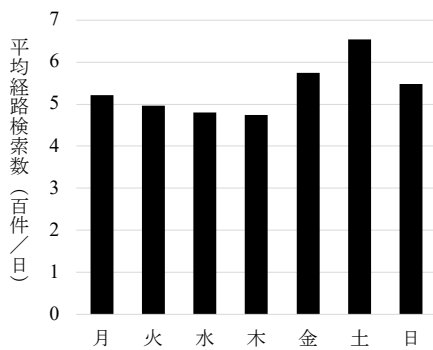


図-3 曜日別平均経路検索数

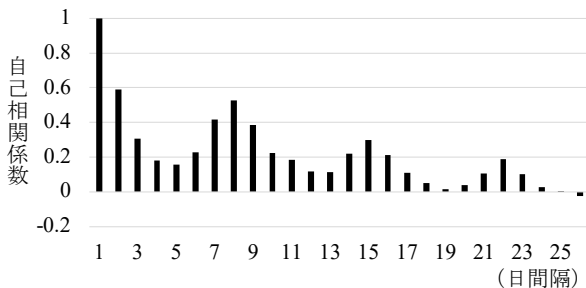


図-4 経路検索数のコレログラム

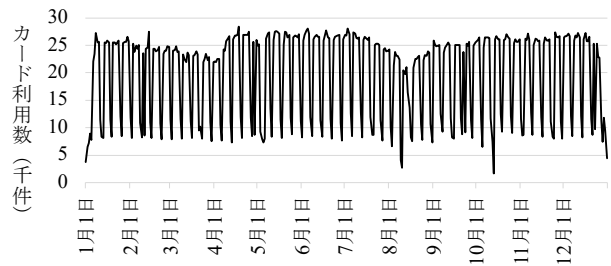


図-5 日別カード利用数の推移

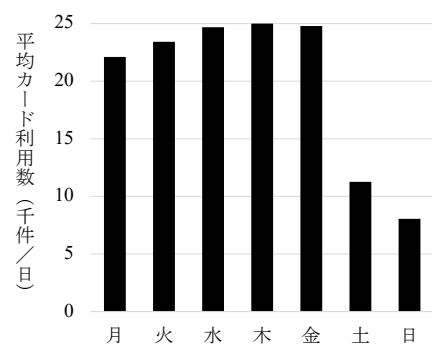


図-6 曜日別平均カード利用数

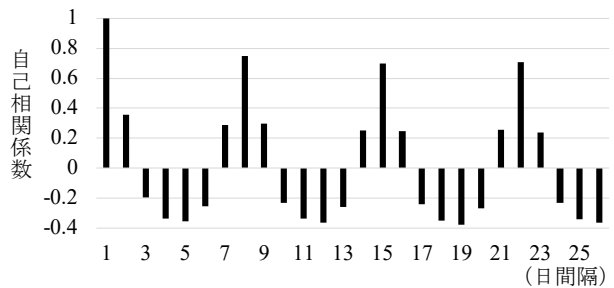


図-7 カード利用数のコレログラム

図-6には曜日別の平均カード利用数を示す。曜日別の平均カード利用数は月曜日から木曜日にかけて増加し、金曜日から日曜日にかけて減少している。また、平日の平均カード利用数 23,988 件に対して休日の平均カード利用数は 9,649 件であることから、平日と休日とではカード利用数に大きな差があることがわかった。さらに、図-7のカード利用数のコレログラムからは、7日の周期で強い自己相関があるとわかり、経路検索数と同様にカード利用数（本研究では鉄道利用者数と同義とする）にも曜日による周期性があると考えられる。

4. 経路検索数と鉄道利用者数の関係

線形・ガウス型の 2 変量状態空間モデル⁸⁾¹²⁾を用いて、経路検索数とカード利用数のそれぞれの時系列変動から非定常的な成分を抽出する。経路検索行動と鉄道利用行動には相互依存性が存在すると考えられるため、2 変量状態空間モデルを用いることによって、2 つの事象間の相関関係を考慮した時系列データの変動成分分解を試みる。そして、抽出した非定常的なカード利用数と経路検索数の関係を単回帰モデルを用いて分析する。

(1) 2 変量状態空間モデルによる成分分解

状態空間モデルは時系列の変動をいくつかの成分に分解でき、多様なバリエーションのモデルがある。本研究では前章のコレログラムの結果を踏まえ、確定的周期要素のある確率的ローカルレベルモデルを適用する。つまり、日別経路検索数と日別カード利用数の変動には、確率的レベル成分、周期成分（曜日成分と祝日成分）、誤差成分が存在すると仮定する。さらに、本研究では時系列の変動をレベル成分、周期成分、誤差成分に分けたときに、レベル成分と周期成分の和で表現されるのが定常的な行動、誤差成分で表現されるのが非定常的な行動と考え、経路検索数とカード利用者数の誤差成分をそれぞれ抽出する。

経路検索数とカード利用数のレベル成分の結果を図-8、図-9に、曜日成分の結果を図-10、図-11に、祝日成分の結果を図-12、図-13に、誤差成分の結果を図-14、図-15に示す。

図-8、図-9より、経路検索数とカード利用数の周期的な変動や突発的な変動が取り除かれた、各変動の水準が確認できる。経路検索件数の全期間におけるレベル成分の平均値は 533 件で、値が年末年始や 3 月中旬、8 月中旬にかけて増加している。これは冬休みや春休み、お盆休みといった長期休暇期間にかけて経路検索が多く行われる傾向があることを示している。一方、カード利用数の全期間における平均値は 19,679 件であり、値が年末年

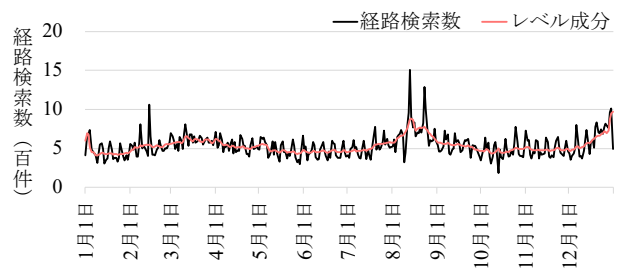


図-8 経路検索数のレベル成分

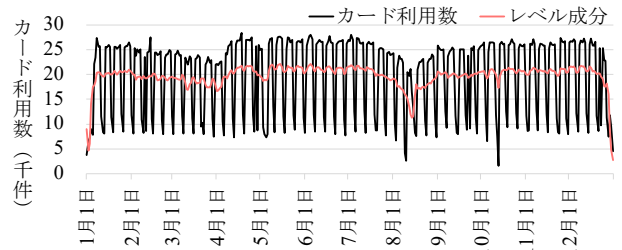


図-9 カード利用数のレベル成分

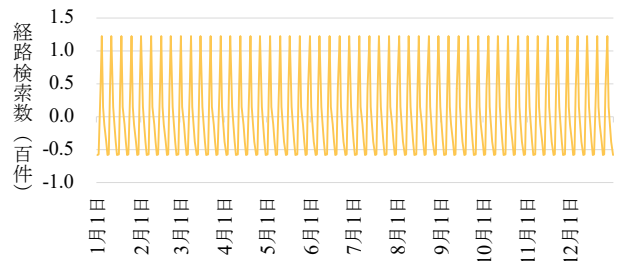


図-10 経路検索数の曜日成分

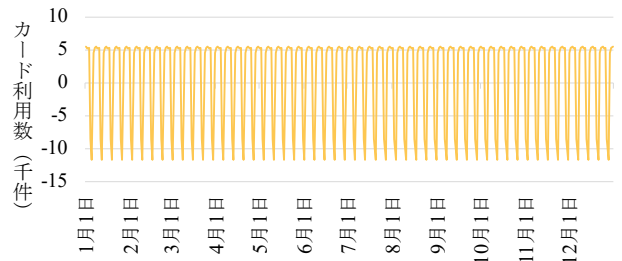


図-11 カード利用数の曜日成分

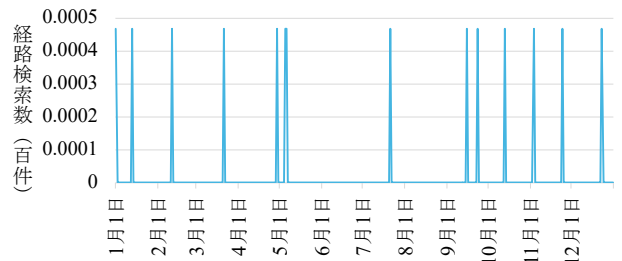


図-12 経路検索数の祝日成分

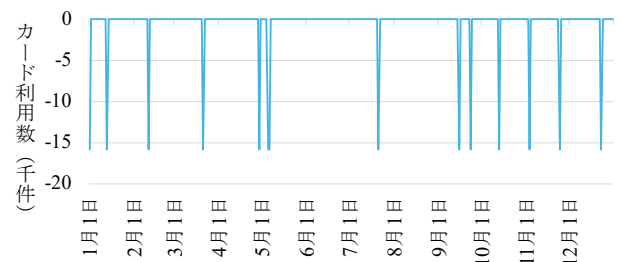


図-13 カード利用数の祝日成分

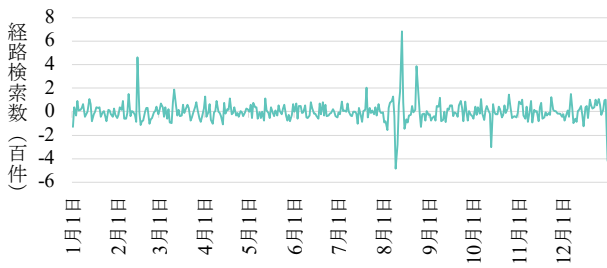


図-14 経路検索数の誤差成分

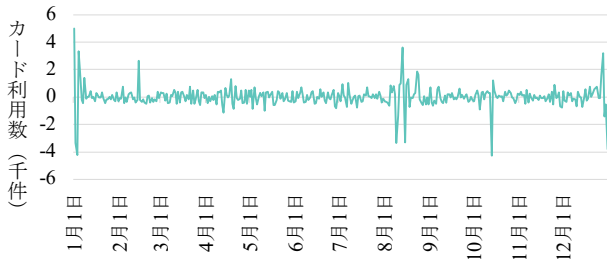


図-15 カード利用数の誤差成分



図-16 経路検索数の曜日成分の推定値

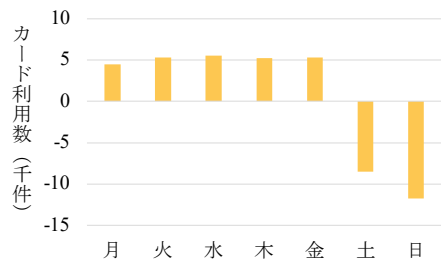


図-17 カード利用数の曜日成分の推定値

始と5月上旬、8月中旬、10月中旬において減少している。年末年始と5月上旬、8月中旬の減少はそれぞれ冬休みとゴールデンウィーク、お盆休みの長期休暇期間であることから、通勤通学客数が減少したことに起因すると考えられる。

図-10、図-11の各変動の曜日成分からは曜日による周期性が確認できる。曜日成分の曜日ごとの成分値の推定結果を図-16、図-17に示す。周期成分は確定的要素としてパラメータ推定を行なっているため、年間を通じて曜日ごとに一定の値を持つ。経路検索数の曜日成分の推定値は月曜日から木曜日にかけては負である一方、金曜日から日曜日にかけては正である。また、土曜日はどの曜日よりも大きい値である。この傾向は2.(2)のa)に示す図-3と同様の傾向であることから、パラメータ推定が適切に行われていることを裏付け、推定値の大小関係から、

水曜日と木曜日は特に経路検索数が少なく、週末は多いことがわかる。一方、カード利用数の曜日成分の推定値は月曜日から金曜日では大きな変化はないが、土曜日と日曜日では負となり、日曜日に最小値をとる。この傾向も2.(2)のb)に示す図-6と同様のものであり、平日は通勤や通学などによる利用が定常的に発生するのに対して、土曜日と日曜日は会社や学校が休みにより定常的な利用が減少することを表しているといえる。

図-12、図-13の各変動の祝日成分からは祝日による周期性が確認できる。図-12より、経路検索数の祝日成分の推定値は正であり、祝日はそれ以外の日より経路検索が多く行われていることが示された。ただし、図-16に示す金曜日、土曜日、日曜日に対応する推定値よりも祝日の推定値は低いことから、月曜日から木曜日において祝日である場合でも経路検索数は通常の週末よりも少ないと推察できる。図-13からは祝日のICカード利用数はそれ以外の日より少ないことが示された。また、図-17に示す月曜日から金曜日の推定値と祝日の推定値との和はいずれも-11程度であり、日曜日の推定値(-11.7)とほとんど差がないことから、祝日のカード利用数は日曜日と同程度に少ないといえる。これは祝日が日曜日と同様に会社や学校が休みであるためと考えられる。

図-14、図-15の各変動の誤差成分からは非定常的な行動を確認する。本研究ではレベル成分と周期成分では説明できない変動である誤差成分が非定常的な行動を表すと考える。ここで、各誤差成分が非定常的な経路検索行動と非定常的な鉄道利用行動を表しているのかの妥当性を検討する。そのために、誤差成分の変動が特に大きい日(特異日)を抽出し、非定常的な行動が発生した要因を考察する。本研究では経路検索数とカード利用数それぞれの標準化した誤差成分の値が、自由度364(=365-1)を持つt分布の両側95%点に基づき、1.967を上回る、あるいは-1.967を下回る誤差成分を抽出する。その結果、経路検索数については該当日が11日、カード利用数については該当日が15日存在した。経路検索数とカード利用数の誤差成分が大きく変動した日とその要因として考えられる事象をそれぞれ表-1、表-2に示す。なお、要因の特定にはWebサイトで香川県を対象に該当日の出来事を検索し、誤差成分の増減に関係があると考えられる情報を用いた。

表-1の経路検索数の誤差成分に基づく特異日について誤差成分の値が正である日に着目すると、2月14日は大雪によるダイヤの乱れを考慮した経路検索数の増加が関連すると考えられる。7月20日や8月12日、8月13日は連休中の外出の増加に伴い経路検索件数も増加したと考えられる。また、8月13日は香川県高松市内で開催された花火大会に向かう人々の移動需要によるものと推察される。8月23日、8月24日は国営讃岐まんのう公園で

表-1 経路検索数の誤差成分に基づく特異日とその要因事象

該当日	誤差成分の値	要因となる事象
2月14日	4.63	大雪
3月11日	1.90	?
7月20日	2.06	三連休
8月9日	-4.83	台風
8月10日	-2.79	台風
8月12日	1.71	盆休み
8月13日	6.85	盆休み・花火大会
8月23日	3.88	音楽フェス
8月24日	2.31	音楽フェス
10月13日	-3.00	台風
12月31日	-4.18	年末

表-2 カード利用数の誤差成分に基づく特異日とその要因事象

該当日	誤差成分の値	要因となる事象
1月1日	5.02	年始
1月2日	-3.33	年始
1月3日	-4.22	年始
1月4日	3.36	年始
1月5日	2.00	年始
2月14日	2.65	大雪
8月9日	-3.35	台風
8月13日	3.60	盆休み・花火大会
8月15日	-3.30	盆休み
8月23日	1.87	音楽フェス
8月24日	1.63	音楽フェス
10月13日	-4.28	台風
12月27日	1.56	コンサート
12月28日	3.21	コンサート
12月31日	-3.79	年末

開催された中四国最大規模の野外音楽フェスに伴い経路検索数が増加したと考えられる。一方で、誤差成分の値が負である8月9日、8月10日および10月13日は台風で外出を見合わせたことによって普段よりも経路検索数が少なかったといえる。12月31日は年末であったことが関係していると考えられる。なお、3月11日については要因となる事象を見つけれなかった。

一方、表-2のカード利用数の誤差成分に基づく特異日について誤差成分の値が正である日に着目すると、2月14日、8月13日、8月23日、8月24日は経路検索数の抽出結果と共通している。負の値を示す特異日については8月9日、8月13日、12月31日が経路検索件数の抽出結果と一致した。経路検索数の誤差成分に基づく特異日にはなかった日としては、1月1日から5日が挙げられる。この期間の誤差成分の値は正負が統一していないが、年始の連休に起因する鉄道利用行動と関連していると考えられる。また、12月27日、12月28日は高松市内のいくつかの施設で開催された音楽コンサートに行くために鉄道利用数が増えたと推察される。

以上を整理すると、経路検索数の誤差成分およびカード利用数の誤差成分ともに、天候やイベント、連休に関

表-3 回帰分析の推定結果

変数	推定値
定数項	8.92
経路検索数の誤差成分	5.02 *
サンプル数	365
決定係数	0.30
自由度調整済み決定係数	0.30

* : 有意水準 0.1%

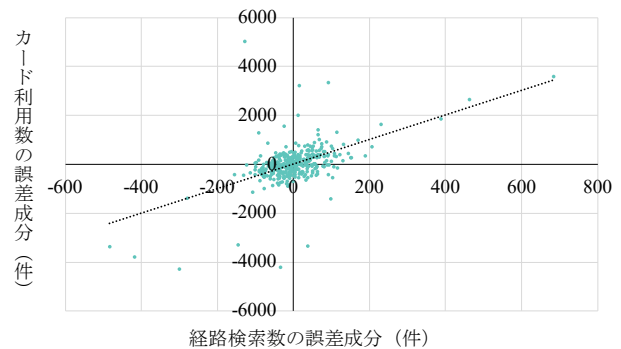


図-18 誤差成分の散布図

連して変動していることがわかり、普段の行動とは異なる非定常的な変動として捉えることは妥当といえる。また、経路検索数の誤差成分に基づく特異日とカード利用数の誤差成分に基づく特異日の多くが一致することから、非定常的な経路検索行動は非定常的な鉄道利用行動を反映している可能性が高い。

(2) 非定常的経路検索数と非定常的鉄道利用者数の関係分析

非定常的な行動を表す誤差成分同士の関係、すなわち経路検索数の誤差成分とカード利用数の誤差成分の関係を分析する。本研究では目的変数にカード利用数の誤差成分、説明変数に経路検索数の誤差成分を投入した単回帰モデルにより、両者の関係を明らかにする。

推定結果を表-3に、各誤差成分の散布図を図-18に示す。回帰分析の結果、自由度調整済み決定係数は0.30となり、相関の程度は強くはないものの、非定常的な経路検索数と非定常的なカード利用数には正の相関があることがわかった。前節では、経路検索数とカード利用数の誤差成分の絶対値が特に大きい日に着目し、どちらも天候やイベント、連休などに伴う非定常的な行動によるものであることを把握したが、回帰分析の結果から絶対値が小さい日も含めた全サンプルでも正の相関関係があることがわかった。

5. 結論

MaaSの実現には、移動需要に対して交通の供給量が

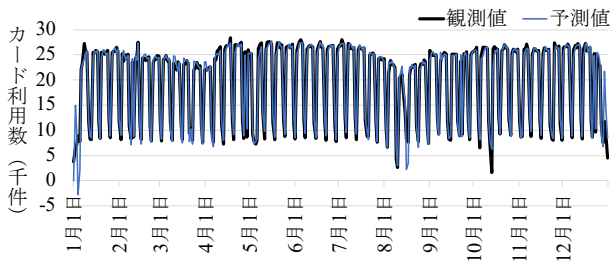


図-19 経路検索数に基づくカード利用数の予測値と観測値

適切である必要があり、日々変動する需要を予め把握しておくことが求められる。そのため、従前より把握可能であった通勤や通学のような定常的な需要に加えて、突発的な事象の発生に伴う需要、すなわち非定常的な公共交通利用者数の予測の必要性が高まっている。

本研究では経路検索データを活用した交通需要予測手法の開発に向けた事前分析として、非定常的な経路検索行動と非定常的な鉄道利用行動の関係性に着目し、2段階の手順からなる手法によって両者の関係を明らかにした。第1段階では、2変量状態空間モデルにより時系列データの変動を分解する成分に、時系列変動の水準を表すレベル成分、周期的な変動を表す曜日成分、祝日成分を仮定し、残る時系列変動を非定常的な成分として抽出した。第2段階では、抽出された非定常的な成分に回帰分析を適用し、非定常的な経路検索数と非定常的なカード利用数の間に正の相関があることを示した。

非定常的な経路検索数と非定常的なカード利用数の関係性を用いて、経路検索数の予測値に基づくカード利用数の予測値を推定し、現況再現性を確認すると図-19のような結果となった。現況再現性を示すRMSE（平均平方二乗誤差：Root Mean Square Error）は、1,409件となった。

今後は他地域でも同様の分析を行い、経路検索行動と実際の公共交通利用行動の関連性に関する研究蓄積を増やすことが課題である。

参考文献

- 1) 楠田悦子：60分でわかる！MaaS モビリティ革命，技術評論社，2021。
- 2) 国土交通省，令和2年度日本版MaaS推進・支援事業38事業について，<https://www.meti.go.jp/press/2020/07/20200731005/20200731005-2.pdf>
- 3) 国土交通省，需要に合わせた供給最適化とポストコロナ需要変容を踏まえたデータ分析・施策のための高松MaaS実証実験，<https://www.mlit.go.jp/sogo-seisaku/transport/content/001410283.pdf>
- 4) 伊藤昌毅，見生元気，川村尚生，菅原一孔：乗換案内サービス利用履歴から探る公共交通の利用状況，第9回電子情報通信学会ヒューマンプロブ研究会，CD-ROM，3 pages，2013。
- 5) 桑野将司，秋元美穂奈，細江美欧，古川ゆり，菅原一孔：経路検索履歴データを用いた移動特性の分析，土木学会論文集D3（土木計画学），Vol.75，No.6，pp.I_501-I_511，2020。
- 6) 細江美欧，桑野将司，森山卓：経路検索に現れる移動需要と駅周辺環境の関連性分析，土木学会論文集D3（土木計画学），Vol.76，No.5，pp.I_377-I_384，2021。
- 7) 高松琴平電気鉄道株式会社，路線図，<https://www.kotoden.co.jp/publichtm/kotoden/time/>
- 8) J.J.F.コマンダー，S.J.クープマン：状態空間時系列入門，pp.9-127，シーエーピー出版，2008。
- 9) E. E. Holmes, E. J. Ward, and M. D. Scheuerell：Analysis of multivariate time-series using the MARSS package version 3.10.12，Northwest Fisheries Science Center NOAA Seattle, WA, USA，2020。
- 10) 石田基広，萩原淳一郎，瓜生真也，牧山幸史：基礎からわかる時系列分析，pp.37-38，pp.72-151，技術評論社，2018。
- 11) 野村俊一：カルマンフィルタ-Rを使った時系列予測と状態空間モデル，pp.71-112，共立出版，2016。
- 12) Elizabeth E. Holmes, Eric J Ward, Kellie Wills：MARSS: Multivariate Autoregressive State-space Models for Analyzing Time-series Data，https://journal.r-project.org/archive/2012-1/RJournal_2012-1_Holmes-et-al.pdf

AN ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN ROUTE SEARCH LOG DATA AND RAILWAY SMART CARD DATA

Mio HOSOE, Masashi KUWANO, Taku MORIYAMA