

# 経路検索履歴データを用いた バス時刻表の設計に関する研究

桑野 将司<sup>1</sup>・秋元 美穂奈<sup>2</sup>・細江 美欧<sup>3</sup>・古川 ゆり<sup>4</sup>・菅原 一孔<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 鳥取大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南四丁目101)  
E-mail: kuwano@sse.tottori-u.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 鳥取大学 持続性社会創生科学研究科工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南四丁目101)  
E-mail: M17J6001X@edu.tottori-u.ac.jp

<sup>3</sup>学生会員 鳥取大学 持続性社会創生科学研究科工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南四丁目101)  
E-mail: M17J6029X@edu.tottori-u.ac.jp

<sup>4</sup>学生会員 鳥取大学 持続性社会創生科学研究科工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南四丁目101)  
E-mail: M18J6030K@edu.tottori-u.ac.jp

<sup>5</sup>非会員 鳥取大学教授 工学研究科情報エレクトロニクス専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南四丁目101)  
E-mail: sugahara@eecs.tottori-u.ac.jp

経路検索システムには時刻表にとらわれない検索者のいつ、どこから、どこへ移動したいかという希望に関するデータが蓄積されている。本研究では、山陰両県に導入されている経路検索システム「バスネット」の検索ログデータを用いて、検索者の移動希望に応じたバスの時刻表設計方法を検討した。具体的には、検索ログデータから同一検索者の検索を抽出し、各検索者の移動がシステム上で入力した指定時刻に対して遅れを許すか否かを判定した。そして、検索者の外出希望時刻と実際のバスの運行時刻との差として定義される損失時間を算出し、乗車時間を加えた総所要時間を最小にするようなバス時刻表の設計方法を提案した。さらに、提案手法を用いてバスの便数が削減された場合の時刻表を作成し、便数削減の損失時間に及ぼす影響を明らかにした。

**Key Words :** *Route Search Service, Bus Timetabling, Loss Time, Simulated Annealing*

## 1. 序論

社会の IT 化や情報通信技術の発展により、リアルタイムに蓄積されるデータの継続的かつ長期的な収集が可能となり、ビッグデータという新たなデータを用いた研究が盛んである。交通分野では、プローブカーデータ<sup>1)</sup>や GPS<sup>2)</sup>による位置情報データ等のビッグデータが活用されている。これらのビッグデータを活用することにより、これまで拾いきれなかった詳細な交通行動を捉えることができると期待されている。特に、公共交通機関の利用実態を把握する上で交通系 IC カードデータ<sup>3)</sup>が着目されている。しかし、地方都市では、交通系 IC カードが未導入な地域も少なくはない。そこで、経路検索システムに蓄積されている検索ログデータによって交通行動の特性を把握する試みが行われている。

経路検索システムとは、目的地や出発地に合わせて公

共交通を利用したい希望日や希望時間帯を入力すると、経路や運賃、所要時間等が提示される Web サービスの一種である。「NAVITIME」や「駅すばあと」のような経路検索システムは全国的に展開されている。このような全国展開されている経路検索システムでは、コミュニティバスのような地方自治体が運営している地域特有の路線バスの時刻表や経路、バス停までを完全には網羅しきれていない部分もあり、高知県の「アクセスこうち」<sup>4)</sup>や山口県の「キララバスナビ」<sup>5)</sup>といった地域限定で導入されているサービスも存在する。

大手企業が配信している経路検索システムの検索ログデータを分析した研究として、石村ら<sup>6)</sup>の研究が挙げられる。石村らは、経路検索を行う際の条件を蓄積した経路検索実績データ、経路検索エンジンにより算出された検索経路選択肢集合である検索経路データ、経路選択肢集合から検索者が選択した経路を表す経路選択データの

3 つを経路選択行動分析データとし、所要時間や運賃、乗換回数といった情報提供が経路選択行動に及ぼす影響を分析している。一方、地域独自に導入された経路検索システムの検索ログデータを用いた研究として、伊藤ら<sup>7)</sup>の研究が挙げられる。伊藤らは鳥取県に導入されている経路検索システム「バスネット」の検索ログデータを解析し、経路検索システムでの検索件数と実際のバス利用者数を比較した。その結果、経路検索された件数と実際の利用者数との間に高い相関があることを明らかにした。香川ら<sup>8)</sup>は、蓄積された検索ログデータのうち起終点情報を利用者の移動希望と定義し、主成分分析を用いることによって組み合わせ数が莫大な起終点情報を集約し、特徴のある検索パターンを抽出した。さらに、時系列分析を用いて各移動希望の曜日変動、および月変動を求めると鳥取市の交通特性を把握した。このことから、空港や有名観光地を起終点に指定する旅行者の移動希望や冬季の通勤・通学者の移動希望といった移動の目的や対象地域の天候が起因した交通特性を把握した。また、古川ら<sup>9)</sup>の研究では、経路検索システムでの検索実行時刻と指定時刻との時間差を「事前検索時間」と定義し、生存時間分析を用いて事前検索時間の長短に影響を及ぼす要因を明らかにした。実際の交通行動特性を分析した研究は多く存在するが、それらの交通行動がどれくらい前に計画されたかを経路検索システムの検索ログデータから分析した点が古川らの研究の特徴である。

このように経路検索システムに蓄積されている検索ログデータを用いた研究が進められているが、既往研究の多くは、検索行動の特徴把握にとどまっており、実行動との比較や実際の公共交通の運行計画への反映は十分であるとはいえない。本研究では、経路検索システムに蓄積されている検索ログデータは検索者がいつ、どこから、どこへ移動したいかという時刻表にとらわれない検索者の移動希望を表していると仮定し、利用者の移動希望に応じたバスの時刻表を設計するための方法論を提案することを目的とする。具体的には、鳥取市の中心市街地周辺を巡回するコミュニティバス「くる梨」を対象として、検索ログデータから繰り返し検索を行ったと考えられる同一検索者を抽出することによって、各検索者の移動がシステム上で入力した指定時刻に対して遅れを許容するか否かを判定する。そして、検索者の外出希望時刻と実際のバスの運行時刻との差として定義される損失時間を算出し、乗車時間を加えた所要時間を最小にするくる梨のバス時刻表の設計方法を提案する。

公共交通の時刻表再編を目的とする研究はこれまでも盛んに行われてきた。高山ら<sup>10)</sup>は、運行可能バス台数と所要時間を制約条件として輸送人員が最大になるように組み合わせ最適化問題を定式化した。また、その解法に遺伝的アルゴリズムを用いることで路線網とバスダイ

ヤを同時に決定する複雑な最適化問題を解くことを可能にした。また、高山ら<sup>11)</sup>は、コミュニティバスを対象とした路線網策定システムの構築に関する研究も行っており、住民の福祉的立場や地域の市街地活性化を重視したコミュニティバスの路線網を理論的に策定するシステムを提案した。田中ら<sup>12)</sup>は、運行本数が少ない地域での円滑な乗換えを保証するバス時刻表を設計した。具体的には、公共交通ネットワーク全体の接続関係を考慮した上で、バス路線や鉄道間の円滑な乗換えを保証し、遅延を吸収する仕組みを備えたバス時刻表を設計した。

これらの既往研究の多くは、アンケート調査から得られた公共交通利用者の交通行動データを用いたバス時刻表の設計方法を提案している。しかし、アンケート調査で継続して利用者の交通行動を把握することは困難である。また、既往研究では、現状のバス利用者の行動を基礎とした最適化を考えている。しかし、サービス水準が低い地域においては、利用者の選好が実際の行動として顕在化されるとはいえず、いつ、どこに移動したいかという潜在的なニーズを現状の行動から把握することは難しい。本研究では、経路検索システムの検索ログデータの活用可能性を示すとともに、検索行動から捕捉する潜在的な利用者ニーズに応じた運行計画を提示し、便数削減が利用者の所要時間に及ぼす影響を明らかにする点に新規性がある。

## 2. バスネットと使用データの概要

### (1) バスネットと検索ログデータの概要

#### a) バスネットの概要

本研究では、鳥取県と島根県の山陰両県に導入されている経路検索システム「バスネット」の検索ログデータを用いる。図-1にバスネットのWeb上での検索画面と経路探索結果画面の例を示す。バスネットとは徒歩移動を考慮したバスや鉄道等の乗換案内を行う経路検索機能と、



図-1 バスネットのWeb上での検索画面と経路探索結果画面

バス停や駅間の時刻表を表示する時刻表検索機能，運行中のバスの現在位置情報を提供するバスロケーションシステムを有するWebアプリケーションである<sup>13)</sup>。2003年からバスネット開発に関する研究が開始し，鳥取大学工学部計算機工学AB研究室によって経路探索アルゴリズムやシステムが開発された。現在は，日本トリップ有限責任事業組合によって運営が行われている。2006年4月から鳥取県東部地域での運用を開始し，2015年11月からは運用対象地域が島根県にも拡張され，現在では山陰両県のバスと鉄道情報を網羅した経路検索システムである。

**b) 検索ログデータの概要**

バスネットに蓄積される検索ログデータの項目を表-1に示す。起終点に関するデータ項目に着目すると，バス停名や駅名といった地点名とは別に，地点の緯度経度情報が蓄積されている。これは，バスネット上での起終点の指定方法に，予めバスネット内に登録されているバス停名や駅名，施設名等のランドマークから選択するランドマーク検索と，検索者が地図上で任意に指定した地点を起終点に設定する緯度経度検索の2通りが存在するためである。また，日時に関するデータは，検索者がバスネットにアクセスした日時と検索者が検索画面上で指定した公共交通の利用日時（以降，指定時刻）についてそれぞれ蓄積されている。また，バスネットの時刻指定方法は，1) 特定の時刻を指定する方法，2) 検索実施時刻から何分後に出発するかを指定する方法，3) 始発の時刻を指定する方法，4) 終発の時刻を指定する方法の4種類が存在する。さらに，検索ログデータには検索者の設定した条件に対して提示した公共交通の発着時刻や所要時間，運賃等の情報が蓄積されている。本研究では，検索者が入力した起終点，指定時刻，時間指定方法，経路検索結果に関するデータを使用する。

2015年から2017年（36ヶ月）の月別アクセス数の推移を，図-2に示す。過去3年間における1か月あたりの平均アクセス数は約25,400件であった。2015年1月，2015年8月，2017年2月の検索数が前後月に比べて検索件数が多いことがわかるが，なぜこれらの時期に検索件数が増加したかについての原因は不明である。

**(2) 100円循環バス「くる梨」の概要**

「くる梨」とは，鳥取市内を巡回するコミュニティ型循環路線バス的一种である。鳥取市中心市街地を100円で移動できる手段を確保することにより，市民の生活の利便性を高めるとともに中心市街地内の回遊性を促進し，中心市街地を活性化させることを目的に導入されている<sup>14)</sup>。くる梨は，2002年10月から2回の試運転を経て2004年1月に運行を開始した。運行開始当初は赤と青の2コースのみだったが，2013年から緑コースを新たに導入し，現在は緑，青，赤

表-1 バスネットログデータの内容

項目	備考
起終点	バス停名，駅名，施設名，緯度経度
日時	検索実施日時，公共交通指定利用日時（指定時刻）
時刻指定方法	検索実施時刻から何分後に出発，特定の時刻指定 始発時刻，終発時刻
発着指定	出発指定，到着指定
指定交通機関	鉄道を含む，バスのみ
指定バス会社	日の丸自動車，日本交通，コミュニティバス，一畑バス
アクセス端末	携帯電話，スマートフォン，パソコン，タブレット端末，アンドロイドアプリ，インテリジェントバス停
経路検索結果	出発地，目的地，経由地，利用公共交通の発着時刻，所要時間，待ち時間，利用公共交通の路線

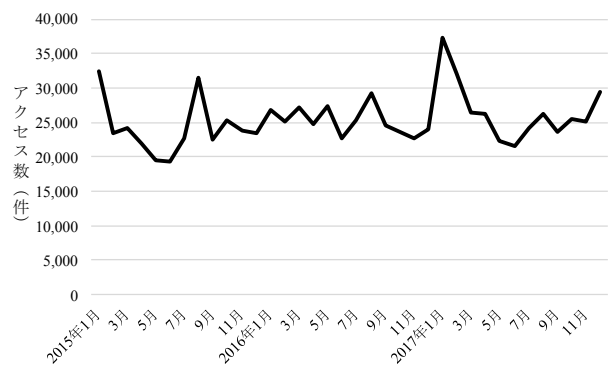


図-2 バスネットへのアクセス数の推移

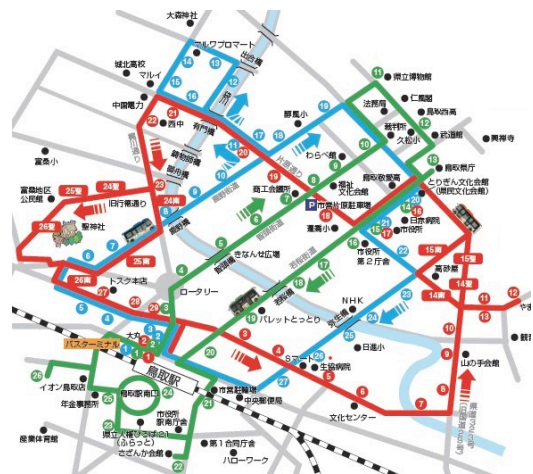


図-3 くる梨路線図<sup>14)</sup>

の3コースで鳥取駅を中心に鳥取市中心市街地とその周辺を巡回している。図-3にくる梨の路線図を示す。緑コースは駅南側から駅北側にある智頭街道や若桜街道のような主要な商店街を経由し，仁風閣や久松山といった中心市街地内の観光地を巡回している。青コースと赤コースはそれぞれ中心市街地周辺の住宅地やスーパー等の買い物施設を網羅するように巡回している。このように，



表-2 くる梨の運行形態<sup>15)</sup>

項目	備考
路線数	3 コース (緑, 青, 赤)
運行本数	平日 31 便/1 コース 土日祝日 28 便/1 コース
バス停数	緑: 26 か所, 青: 27 か所, 赤: 32 か所
運行方法	循環・定時運行 (約 20 分間隔)
所要時間	35 分 (一周約 7 km)
運賃	100 円 (1 回の乗車につき) 半額: 障がい者等とその介護者 無料: 小学生未満, 鳥取子育て支援カード所持者
運行事業者	日本交通株式会社, 日ノ丸自動車株式会社

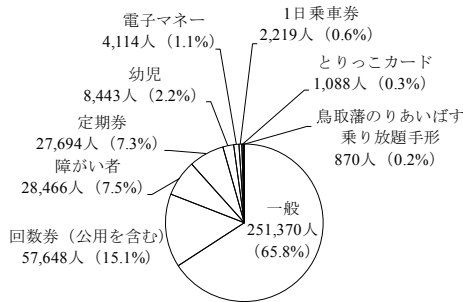


図-4 利用者区分別利用者割合<sup>15)</sup>

くる梨は鳥取市内の観光地だけでなく、官公庁やスーパー、病院等の生活関連施設、また教育関連施設周辺にも停車し、鳥取市民の生活に根付いた運行経路であることがわかる。

くる梨の運行形態の概要を表-2に示す。運行本数に着目すると、平日は31便、土日祝日は平日の1~3便目が運休となった28便での運行となる。3コースとも約20分間隔で運行しており、一周当たりの所要時間は約35分である。また、くる梨の運賃形態は鳥取市内を運行する他の路線バスとは異なり、一度の乗車運賃は100円であり、ワンコインでどこまでも行くことができる。1ヶ月定期券や回数券も存在し、現金だけでなくWAONやクイックペイなどの電子マネーによる支払いも可能である。

図-4に利用者区分別利用者割合を示す。一般の利用者が65.8%と最も多く、次いで回数券 (15.1%)、障がい者 (7.5%)、定期券 (7.3%) の順に占めている。回数券や定期券の利用者も一定数いることから、くる梨は買い物や周遊行動以外に通勤・通学にも利用されていると考えられる。

### (3) 使用データの概要

本研究では、2017年1月1日から2017年12月31日までの12ヶ月間に検索されたログデータを分析対象とする。この1年間の検索件数は319,961件であった。このうち出発地または目的地が正確に記録できていないデータや経路結果が正しく記録されていない検索等のシステ

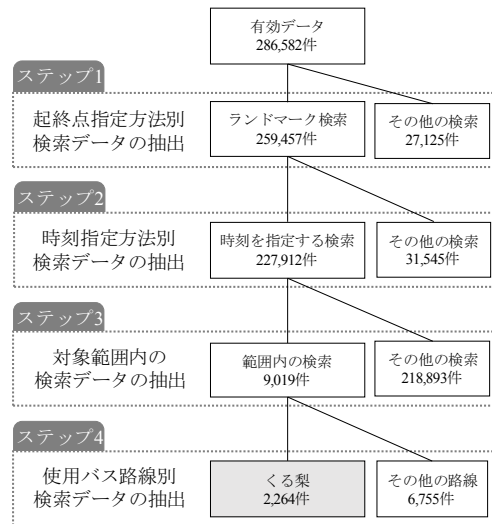


図-5 データスクリーニング手順

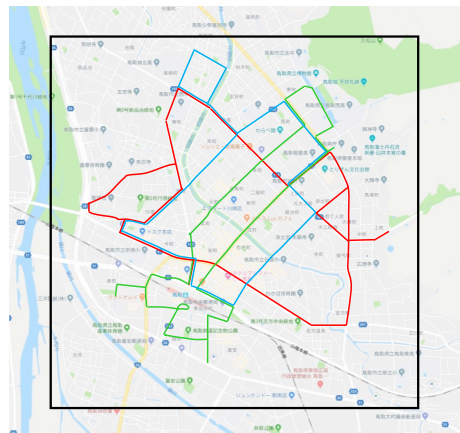


図-6 分析対象地域 (Google map に著者らが加筆)

ム上の問題として生じた欠損データは33,379件であった。

本研究では鳥取市中心市街地を巡回するコミュニティバス「くる梨」を対象に時刻表の設計を考える。しかし、バスネットのログデータにはくる梨を利用した検索を区別し蓄積されていないため、図-5に示す手順で分析に必要なデータを抽出する。

第1ステップとして、検索者の起終点の指定方法に着目しデータを分類する。上述したように、バスネットでは、出発地と目的地の指定方法としてランドマーク検索と緯度経度検索、またこの2つを組み合わせた検索方法がある。このうち、ランドマーク検索を用いた検索が9割以上を占めていることから、本研究では、出発地、目的地共にランドマーク地点を指定した検索のみを使用する。

第2ステップでは、検索時の時刻指定方法に着目しデータを抽出する。2章で説明した通り、バスネットでは4つの時刻指定方法が存在する。本研究では、バスの時刻表の再設計という立場から、何時に移動をしたいかが明確に記録される1) 特定の時刻を指定する方法で検索されたデータ227,912件を分析に用いる。

第3ステップでは、くる梨と関係する検索を抽出する。

くる梨の運行経路から利用可能な範囲として、分析対象地域を図-6のように限定した。図-6の黒枠で囲った範囲内に存在するランドマークは 705 地点あり、該当するランドマークを起終点に指定した検索を抜き出した結果、9,019 件が抽出された。

第 4 ステップでは、くる梨の利用可能性によってデータ抽出を行う。分析対象範囲には、くる梨以外にも複数の路線バスが運行されている。そのため、乗車時間や徒歩時間、乗換えや料金を基に検索者の使用可能な路線を判定し、明らかにくる梨以外のバス路線を利用したほうが利便性が高い場合は、その検索は分析対象から除外した。その結果、2,264 件の検索ログデータが残った。

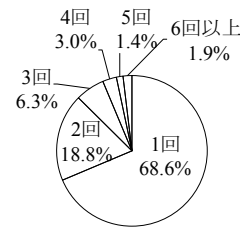


図-7 検索回数別人数割合

### 3. 同一検索者の抽出と実行動との比較

#### (1) 同一検索者の定義と抽出

例えば、ある検索者が経路検索システムを利用したとき、表示された経路検索結果が希望に合わず、時刻を変更し、再度検索を行う場合がある。このような同一検索者による繰り返し検索は、バスネットの検索ログデータからは直接特定することができない<sup>8,9)</sup>。そこで、本研究では以下に示す 5 条件をすべて満たす検索を同一検索者による検索であると仮定する。

- 1) バスネットへのアクセス日が同一である。
- 2) アクセス端末が同一である。
- 3) 前の検索との検索実行時間差が 1 分以内である。
- 4) 公共交通機関の指定利用日が同一である。
- 5) 起終点の組み合わせが同一である。

このような方法で同一検索者の検索を判別した結果、2,264 件中 858 件 (37.9%) が同一検索者による繰り返し検索として抽出された。これらの繰り返し検索を除いた 1,406 件をユニークユーザーによる検索と考えると、うち 441 人が複数回検索を行ったと考えられる。図-7 に検索回数別人数割合を示す。複数回検索を行った検索者は 441 人おり、このうち 2 回繰り返して検索したのが 59.9% の 264 人、3 回検索したのが 20.0% の 88 人、4 回目検索したのが 9.5% の 42 人、5 回以上繰り返したのが 2.5% の 11 人であった。

次に、複数回検索者の 2 回目以降の検索における指定利用時刻の設定に着目する。上述したように、提示された経路検索結果が検索者にとって好ましい結果ではなかった場合に再度検索することが考えられる。その中でも、2 回目以降の検索で指定時刻を 1 回目の検索より早める検索行動は、1 回目に指定した時刻よりも早い時間帯のバスに乗りたい、つまり 1 回目に指定した時刻で提示されたバスでは希望した時間に到着できないと考えられる。すなわち、ある時刻までに目的地に到着したいと

表-3 1 回目の検索との比較

	2 回目	3 回目	4 回目
早める	32.2%	32.3%	40.5%
遅らせる	51.0%	53.1%	45.2%
同時刻	16.8%	14.6%	14.3%

表-4 1 つ前の検索との比較

	2 回目	3 回目	4 回目
早める	32.2%	36.9%	40.5%
遅らせる	51.0%	46.9%	38.1%
同時刻	16.8%	16.2%	21.4%

いう到着時刻に制約がある検索と考えられる。一方、1 回目よりも時刻を遅らせて再検索することは、より遅い時間のバスを利用するために、自身の出発する時刻を遅らせてもよいという意向を表しており、出発時刻を早めたくないという出発時刻に制約がある検索と考えられる。

指定時刻に関して、1 回目の検索を基準に 2 回目以降の検索行動を集計した結果を表-3 に示す。複数回検索の 2 回目以降の指定時刻は、1 回目よりも時刻を遅らせる割合が高いことがわかる。次に、1 つ前の検索と比較した結果を表-4 に示す。ここでの 1 つ前の検索と比較するとは、例えば、3 回検索している人の場合、2 回目の検索は 1 回目と、3 回目の検索は 2 回目の検索と比べることである。表-4 より、3 回目以降の検索については時刻を遅らせる人の割合が減少している。このことから、3 回以上検索する人は指定時刻を前後させながら自身の行動に合う経路を探していると推察できる。

#### (2) 全検索データと 1 回目検索データの比較

同一検索者による複数回検索を区別していないデータ（以降、全検索データ）2,264 件と、同一検索者による繰り返し検索を除いた検索者の 1 回目の検索データ（以降、1 回目検索データ）1,406 件との比較を行い、それぞれの特徴の把握を行う。

図-8 に指定時刻の時間帯別の検索件数を示す。8~10 時台の朝の時間帯、昼の 13 時台、夕方の 17 時台の検索件数が高いことが 2 つのデータに共通して見える。2 つの指定時刻の時間帯別の検索件数の分布について、カイ二乗検定を行った結果、有意差は認められなかった ( $p > 0.01$ )。図-9 と図-10 に全検索データと 1 回目検索データの起終点の組み合わせをそれぞれ示す。なお、ノード

の大きさは検索件数を，リンクの太さは組み合わせ件数を示しており，それぞれで全体の 1%以上検索された起終点のみを示している．**図-9** と**図-10** より，鳥取駅（バス停）と鳥取県庁，県庁日赤前（バス停）といった，鳥取駅（バス停）を含む組み合わせが多いことがわかる．両データにおいて，組み合わせ数が多い上位 20 個の起終点の組み合わせを抽出し，カイ二乗検定を行った結果，両者の間に有意な差が認められた ( $p < 0.01$ )．以上の結果から，指定時刻の時間帯による複数回検索の特徴は見られない．一方で，起終点の組み合わせによって複数回検索のされ方に違いがあることが明らかとなった．

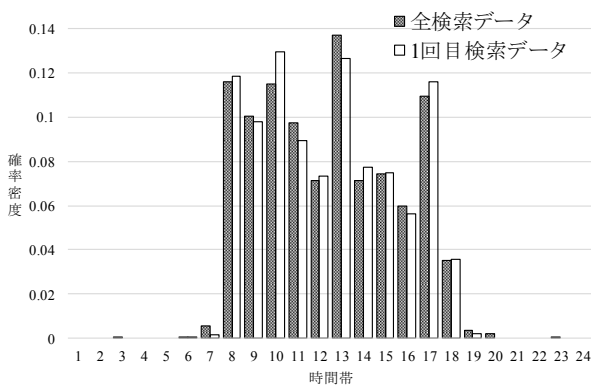


図-8 移動希望時間帯別検索件数

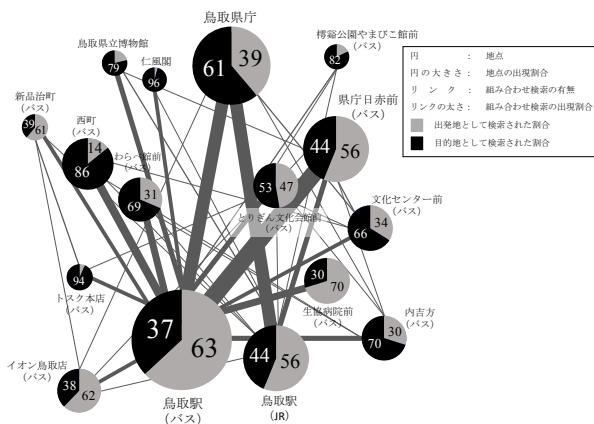


図-9 同一検索者を含むデータの起終点の組み合わせ

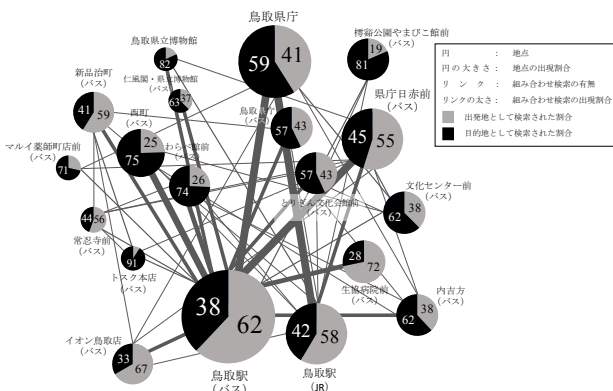


図-10 同一検索者を除いたデータの起終点の組み合わせ

### (3) 検索行動と実行行動との相関分析

前節の比較の結果，全検索データと 1 回目検索データでは起終点の組み合わせ数に違いがあることがわかった．そこで，起終点の組み合わせに着目し，検索行動とくる梨の利用者数（以降，実行データ）との関係性を分析する．実行データに関するデータは，100 円循環バス「くる梨」の現況を調査・整理することを目的に行われた乗降調査のデータを用いる<sup>15)</sup>．この調査は平成 29 年 11 月 18 日（土），11 月 22 日（水）の平休日の 1 日ずつについて，バス停別の乗降車人数を調査したものである．

経路検索システムに含まれる全検索データ，1 回目検索データ，実行データの主要なバス停別の利用者分布を**図-11**に示す．なお，**図-11**において，実行データは平休日 1 日ずつしか存在しないため，平日データを 5 倍，休日データを 2 倍して合計し，年間データへと変換している．

バス停別の利用者数（乗車者+降車者）に対して，全検索データと 1 回目検索データとの相関係数を算出したところ，実行データと全検索データとの相関係数は 0.837，実行データと 1 回目検索データとの相関係数は 0.845 であった．また，平日と休日のそれぞれについての相関係数は，平日の全検索データでは 0.802，1 回目検索データでは 0.810，休日の全検索データでは 0.874，1 回目検索データでは 0.885 となった．

以上の結果より，バス停別の利用者数の観点からは，総体して全検索データよりも 1 回目検索データを用いた方が実行データとの相関が高く，その相関係数は 0.8 以上であることから，実行データと検索行動は関連性があることが明らかとなった．また，平日よりも休日のほうが実行データと検索行動の相関は強いことがわかった．

全検索データよりも 1 回目検索データを用いたほうが実行データとの相関が高いこと，および 2 回目以降の検索は最初に提示された時刻表に満足しなかったことを意味し，1 回目の検索条件こそが利用者の潜在的な利用ニーズであることから，以降の分析では 1 回目の検索行動のみを用いる．

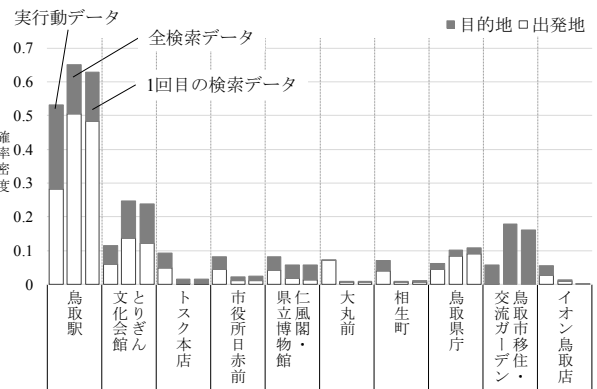


図-11 利用バス停別の利用者分布



## 4. 時刻表の設計手法の提案

### (1) 時刻表作成に関する問題設定

時刻表にとらわれない利用者の移動希望を表す 1 回目検索データを用いて、外出希望時刻と実際のバスの運行時刻との差、すなわち検索者のバス停での待ち時間を最小にする時刻表を検討する。ここで、時刻指定方法には出発時刻指定と到着時刻指定の 2 通りがあること、および 2 回目以降の検索行動がわかることが検索ログデータの特徴であり、これを定式化で考慮する。まず、1 回しか検索を行わなかった検索者について、出発時刻指定を行った場合は、指定時刻と当該バス停をバスが出発する時刻の差を損失時間とする。例えば、出発指定時刻に 10 時 00 分を入力し、実際のバスが 10 時 10 分に当該バス停を出発する際、損失時間は 10 分と考える。一方、到着時刻指定をした検索者に対しては、到着指定時刻と目的地にバスが到着する時刻の差を損失時間とする。すなわち、11 時 00 分を到着指定時刻にし、バスが当該バス停に 10 時 50 分に到着する場合、損失時間は 10 分と考える。

さらに、2 回目の検索行動についても考慮する。1 回目の検索で出発時刻指定を行い、2 回目の検索ではよりも早い時間のバスを検索したとき、検索者は 1 回目の検索で提示されたバスは自身にとって到着時刻が遅い、すなわち希望した時間には到着できないと考えたからと仮定する。この場合、1 回目の出発指定時刻を希望出発時刻とし、その直後のバス出発時間を考えるのではなく、その直前のバス出発時刻との差を損失時間とする。

1 回目の検索で到着指定時刻を入力し、2 回目の検索でより遅い時刻を指定した場合は、1 回目の到着指定時刻を希望到着時刻とし、希望到着時刻とその直後に到着するバスの時刻との差を損失時間とする。このように、2 回以上検索した場合は、1 回目の出発・到着指定時刻が利用者の本来のニーズと考え、2 回目の検索行動から遅れを許す場合と許さない場合を判定することで、損失時間を定義する。3 回目以降の検索は、より自身にあったスケジュールを探すための行動を考えられるが、1 回目の検索が最もニーズを反映していると考え、本研究では考慮しない。

また、くる梨には 3 コースあり、起終点の組み合わせによっては複数経路が存在する。各コースはそれぞれ巡回する方向が決められており、同じ起終点でも利用するコースによって乗車時間が異なる。つまり、バス停での待ち時間が短いという理由だけでは、検索者にとっての最短経路を判断することができない。そこで、損失時間に乗車時間を加えた所要時間を最小にする最適化問題を考える。

問題の定式化のために、次の条件を設ける。

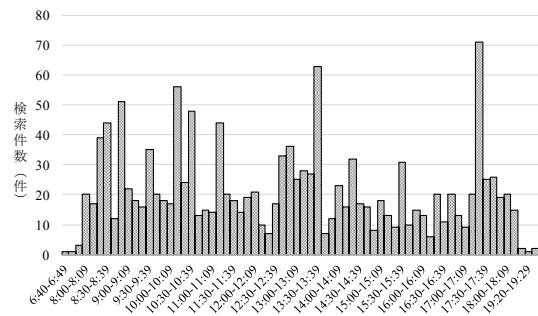


図-12 外出希望時刻の分布

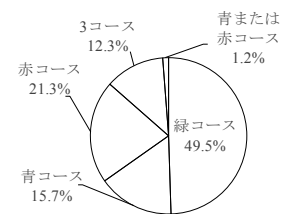


図-13 使用可能コース別検索者割合

- 1) 現況のくる梨の運行経路とバス停を使用する（経路とバス停間所要時間は変わらない）。
- 2) 始発と終発の時刻は現況から変更しない。
- 3) 交通状況によるバスの遅延は考慮しない。

これら 3 仮定を設けることにより、バス停ごとの時刻表ではなく、各コースの始点（鳥取駅）での時刻表設計問題と考えることができる。また、バス停間の所要時間は現況と変わらないとすることで、到着時刻指定であってもバス停間所要時間を差し引くことで、出発時刻指定として読み替えられる。全ての検索行動を出発時刻指定として読み替えたものを外出希望時刻と定義する。図-12 に外出希望時刻の分布を示す。出発時刻 17 時 20 分～17 時 29 分までの間の時刻を外出希望時刻に指定した検索者が最も多く、次いで 13 時 30 分～13 時 39 分、10 時 10 分～10 時 19 分、8 時 50 分～8 時 59 分の順に検索者が多い。また、図-13 に起終点の組み合わせから、使用可能なコース別検索者割合を示す。くる梨の 3 コースのうち、緑コースを利用すると考えられる検索者が約 50% と最も多く、次いで赤コースと青コースの順に多い。このようなコース別の利用傾向は、くる梨乗降調査<sup>15)</sup>による実行動データと一致している。また、コース間で共通のバス停が存在することから、全体のうち 13.5% が複数経路を選択可能であることがわかる。

### (2) 時刻表設計の数理計画モデル

最適時刻表設計のための目的関数を次のように定義する。

$$\min_{k, l, a, g} \sum_{i=1}^I (G_i + B_i + R_i) \quad (1)$$

$$G_i = \sum_{k_g=1}^{K_g=31} \sum_{n_g=1}^{N_g=26} \delta_{Gi} S_{in_g} (|m_{in_g} - t_{n_g}^{k_g}| + x_{Gi}) \quad (2)$$

$$B_i = \sum_{k_b=1}^{K_b=31} \sum_{n_b=1}^{N_b=27} \delta_{Bi} S_{in_b} (|m_{in_b} - t_{n_b}^{k_b}| + x_{Bi}) \quad (3)$$

$$R_i = \sum_{k_r=1}^{K_r=31} \sum_{n_r=1}^{N_r=32} \delta_{Ri} S_{in_r} (|m_{in_r} - t_{n_r}^{k_r}| + x_{Ri}) \quad (4)$$

(1) 式は、緑・青・赤コースでの総所要時間最小化を、 $G_i$ ,  $B_i$ ,  $R_i$ は各コースでの所要時間を表している。

$\delta$ は検索者にとって、そのコースを利用したときの所要時間が最も短いときに1をとるバイナリ変数である。検索者は同時に複数のコースを利用しないので、検索者*i*について式(5)を満たす。

$$\delta_{Gi} + \delta_{Bi} + \delta_{Ri} = 1 \quad (5)$$

$S_{in}$ は検索者*i*( $i = 1, 2, \dots, I$ )がバス停 $n$ ( $n = 1, 2, \dots, N$ )から乗車するとき1をとるバイナリ変数である。 $t_n^k$ は $k$ ( $k = 1, 2, \dots, K$ )便目のバスがバス停 $n$ を出発する時刻を、 $m_{in}$ は検索者*i*のバス停 $n$ を出発する外出希望時刻を、 $x_{Gi}$ ,  $x_{Bi}$ ,  $x_{Ri}$ は検索者*i*の各コースを利用したときの起点のバス停から終点のバス停までの乗車時間をそれぞれ表す。

始発の時刻は固定とすることからバスの運行時刻 $t_n^k$ は、1便目の始点となるバス停を出発するバスの運行時刻 $t_1^1$ を基準に式(6)を用いて求める。

$$t_n^k = t_1^1 + \sum_{k'=1}^k klag_{k'-1} + \sum_{n'=1}^n nlag_{n'-1} \quad (6)$$

( $k-1$ )便と $k$ 便との時間差を $klag_{k-1}$ 、バス停( $n-1$ )とバス停 $n$ 間を移動するのにかかる時間を $nlag_{n-1}$ とおく。交通状況によるバスの遅延は考慮しないので、バス停間の所要時間は一定であることから $nlag_{n-1}$ は既存の時刻表から算出する。さらに、終発時刻も固定なので、算出される $klag_{k-1}$ が始発から終発までの時間内に収まるように $klag_{k-1}$ を基準化した値 $klag'_{k-1}$ を式(7)で求める。

$$klag'_{k-1} = \frac{klag_{k-1}}{(\sum_{k=1}^K klag_{k-1})} \times (t_N^K - t_1^1) \quad (7)$$

式(7)を用いて、 $t_n^k$ を定義しなおしたものが式(8)である。

$$t_n^k = t_1^1 + \sum_{k'=1}^k klag'_{k'-1} + \sum_{n'=1}^n nlag_{n'-1} \quad (8)$$

変数 $klag'_{k-1}$ を用いてコースごとに時刻表を作成する。くる梨は平日と土日祝日では運行便数が異なるため、検索者の指定日を平日と土日祝日に分類する。土日祝日の場合は、1~3便目を運休として扱う。続いて、検索者

が自身の行動の遅れを許容するか否かについて判断する。遅れを許容する検索者は指定した時刻よりも早い時間帯のバスには乗車しないとみなし、 $(t_n^k - m_{in}) \geq 0$ を満たす便についてのみ所要時間を計算する。また、遅れを許さない検索者は指定した時刻より遅い時間帯のバスには乗車しないとみなし、 $(m_{in} - t_n^k) \geq 0$ を満たす便についてのみ所要時間を計算する。そして、各検索者が選択可能なコースについて所要時間を算出し、所要時間が最小となるコースを使用路線に決定する。最後に全検索者の所要時間を合計し、総所要時間が最小になる $klag'_{k-1}$ を求める。本研究では、この最適化問題を、シミュレーション法(以下、SA法)<sup>10)</sup>を用いて解く。

### (3) 時刻表の評価

経路検索システムのログデータには、検索者の設定した起終点に関する情報はあがるが、ログデータからどのコースのバスを使うかは判別できない。そこで、現況のバス時刻表に対して、定式化したモデルを適用し、モデルから算出されるコース別の検索者の利用者数推計と実行データの利用者数の比較を行った。その結果、コース別の各バス停の利用者数の相関係数は0.807と、モデル推計結果と実行データの間には高い相関が認められ、構築したモデルの妥当性が確認できた。

次に、定式化したモデルを用いて、時刻表の最適化前後の総所要時間の比較を行う。表5に最適化前後の鳥取駅発の時刻表の比較を示す。既存の時刻表と比較すると、3コースのいずれにおいても大幅な時刻変更は見られなかった。これは、現在くる梨が20分間隔と高いサービス水準で運行されていることが理由と考えられる。しかし、総所要時間は、既存のパターンダイヤ(20分間隔)では19,370分、最適化した時刻表による総所要時間は16,903分となり、時刻表の変更により10%以上の所要時間の短縮効果が見込まれることがわかった。

さらに、現在の20分間隔のような高いサービス水準を維持することは困難であることから、便数の削減が総所要時間に及ぼす影響を、パターンダイヤ(等時間間隔でバスを運行)と本モデルによる最適化したダイヤを比較することで把握する。バスの運行時間を現況の20分間隔から、30分、45分、60分間隔と変化させたときの総所要時間と、時間間隔に対応した便数で最適化した時刻表の総所要時間の比較を表6に示す。なお、この場合も始発と終発の時刻は変更しないこととする。いずれの運行便数においても、パターンダイヤと提案手法による時刻表の総所要時間の差は大きく、パターンダイヤよりも利用者ニーズに応じた時刻表の設計が有効であることが示された。



表-5 最適化前後のくる梨の鳥取駅発の時刻表

緑コース		青コース		赤コース	
現況	最適化	現況	最適化	現況	最適化
8:07	8:07	8:05	8:05	8:05	8:05
8:35	8:34	8:30	8:30	8:20	8:16
8:55	8:54	8:50	8:47	8:40	8:35
9:15	9:17	9:10	9:00	9:00	8:54
9:35	9:33	9:30	9:19	9:20	9:15
9:55	9:56	9:50	9:42	9:40	9:40
10:15	10:15	10:10	10:03	10:00	10:02
10:35	10:35	10:30	10:21	10:20	10:17
10:55	10:55	10:50	10:36	10:40	10:36
11:15	11:15	11:10	10:59	11:00	10:59
11:35	11:37	11:30	11:21	11:20	11:26
11:55	11:53	11:50	11:41	11:40	11:42
12:15	12:16	12:10	12:02	12:00	12:01
12:35	12:35	12:30	12:24	12:20	12:20
12:55	12:55	12:50	12:41	12:40	12:40
13:15	13:15	13:10	13:07	13:00	12:58
13:35	13:35	13:30	13:30	13:20	13:17
13:55	13:53	13:50	13:50	13:40	13:40
14:15	14:16	14:10	14:09	14:00	14:01
14:35	14:36	14:30	14:29	14:20	14:18
14:55	14:55	14:50	14:49	14:40	14:41
15:15	15:15	15:10	15:14	15:00	15:01
15:35	15:37	15:30	15:38	15:20	15:27
15:55	16:02	15:50	15:57	15:40	15:50
16:15	16:19	16:10	16:17	16:00	16:08
16:35	16:39	16:30	16:38	16:20	16:27
16:55	17:00	16:50	16:55	16:40	16:44
17:15	17:15	17:10	17:14	17:00	17:03
17:35	17:36	17:30	17:31	17:20	17:22
17:55	17:56	17:50	17:53	17:40	17:44
18:15	18:15	18:10	18:10	18:00	18:00

表-6 バスの時間間隔と運行便数

時間間隔 (分)	運行 便数	パターン ダイヤ (分)	最適化 ダイヤ (分)
20	31	19,370	16,903
30	21	29,230	28,560
45	14	41,155	37,646
60	11	48,065	47,767

## 5. 結論

本研究では、鳥取県で運用されている公共交通の経路検索システムである「バスネット」の検索ログデータに着目し、検索者の所要時間を最小にする時刻表の設計手法を提案した。検索ログデータに関する分析結果から、バスネット上での検索行動と実際の利用行動との間には高い正の相関関係があることが明らかになった。また、同一検索者の繰り返し検索を除いたデータのほうが実行行動との相関が高いことも示された。さらに、繰り返し検索から、検索者がシステム上で指定した時刻に対して自身の移動の遅れを許容するか否かといった移動特性を把握する方法を提案した。何時に外出したいか、あるいはその行動は遅れを許容するか否かをアンケート調査や交

通系 IC カード、GPS などのデータで把握することは極めて困難であり、検索ログデータを用いた分析の最大の利点であると考えられる。

さらに、本研究では、鳥取市中心市街地を巡回するコミュニティバス「くる梨」を対象路線とし、複数の路線を同時に考慮した時刻表の最適化モデルを構築した。分析の結果、等時間間隔でバスを運行するパターンダイヤに比べ検索者の利用ニーズに合わせた時刻表の設定が所要時間に及ぼす影響を定量的に示すことができた。

本研究では、分析対象路線をくる梨に限定したが、今後は鳥取市内で運行される他の路線網を考慮した同時分析が必要である。ただし、くる梨とその他の路線バスでは運賃形態が大きく異なるため、複数路線を同時に考慮するためには、所要時間に加えて検索者の1分当たりの時間価値を考慮した分析が必要となる。また、くる梨以外の路線も含めた分析に拡張するためには、起終点の組み合わせによっては複数の路線を乗継ぐよりも徒歩で移動するほうが利便性が高い場合もあり、乗継ぎの利便性を反映した分析枠組みの開発が必要である。

## 参考文献

- 樋口彰, 服部宏充: プローブカーデータに基づいた京都市観光者の観光行動分析, 人工知能学会全国大会論文集, Vol. 28, 4pages, 2014.
- 田中伸治, 藤原直生, 桑原雅夫: 携帯電話からの GPS データを用いた歩行者の経路選択リンク集合の推定, 土木学会論文集 D3, Vol. 67, No. 5, pp. I\_617-I\_624, 2011.
- 細江美歌, 桑野将司, 谷本圭志: 非負値テンソル因子分解を用いた交通系 IC カードデータからの移動パターンの抽出に関する研究, 都市計画論文集, Vol. 53, No. 3, pp. 1320-1326, 2018.
- アクセスこうち, <http://accesskochi.com/>.
- キララバスナビ, <http://kiraraline.net/>.
- 石村怜美, 梶原康至, 太田恒平: 乗換検索サービスの経路選択データを用いた公共交通の経路選択行動分析, 土木計画学会・講演集, Vol. 49, CD-ROM, 8pages, 2014.
- 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, 3pages, 2013.
- 香川喬之, 桑野将司, 福山敬, 谷本圭志, 川村尚生, 菅原一孔: バス経路検索履歴データを用いた移動希望特性の分析, 交通工学論文集, Vol. 2, No. 2, pp. A\_115-A\_124, 2016.
- 古川ゆり, 桑野将司, 秋元美穂奈, 菅原一孔: 経路検索履歴データを用いた事前検索時間の分析, 交通工学研究発表会論文集, Vol. 38, CD-ROM, pp. 293-300, 2018.
- 高山純一, 塩土圭介, 宮崎耕輔: 運行スケジュールを考慮したバス路線網最適化計画策定システムの構築, 都市計画論文集, Vol. 32, pp. 547-552, 1997.
- 高山純一, 柳沢吉保, 中野泰啓, 加藤隆章: コミュニティバスの路線網策定システムの構築, 土木計画学研究・論文集, Vol. 18, pp. 705-711, 2001.
- 田中健裕, 高松瑞代, 菅原宏明, 田口東: 交通状況によ

- る遅延を考慮し円滑な乗換えを保証するバス時刻表の設計, 都市計画論文集, Vol. 52, No. 3, pp. 1320-1326, 2017.
- 13) バスネット, バスネットについて, <https://www.wikisaki.jp/>.
- 14) 鳥取市公式ウェブサイト, 暮らしと環境, 交通・生活・文化・住宅, 100 円循環バス「くる梨」: 100 円循環バス「くる梨」について, <http://www.city.tottori.lg.jp/www/contents/1191039056176/index.html>.
- 15) 鳥取市公式ウェブサイト, 都市整備部交通政策課: 鳥取市 100 円循環バス「くる梨」の現況調査業務報告について, <http://www.city.tottori.lg.jp/www/contents/1534729075730/index.html>.
- 16) 花岡和聖: 焼きなまし法を用いたパーソントリップ調査データの拡大補正法に関する研究, 都市計画論文集, Vol. 41.3, pp.91-96, 2006.

(2019. 3. 10受付)

## BUS TIMETABLE DESIGN USING ROUTE SEARCH RECORD

Masashi KUWANO, Mihona AKIMOTO, Mio HOSOE,  
Yuri FURUKAWA, and Kazunori SUGAHARA

In the public transit navigator system, the user's search behaviors, such as the requested departure place and destination and what time to move, is recorded as log data. The inputted conditions in the public transit navigator system represent the user's real desire for their movement that is not bound by the current timetable status of public transportation. The purpose of this study is to propose a methodology for designing the timetable of the bus according to the searcher's requests using the log data of "Bus-Net", which is a public transit navigator system introduced in Tottori Prefecture, Japan. A search by the same searcher was extracted in this study and judged whether or not the movement of each searcher allows a delay with respect to the designated time inputted in the system. Then, this study calculates the loss of time—defined as the difference between the time the searcher wants to go outside and the actual time of bus operation—and develops an algorithm to design a bus timetable to minimize the total required time, adding riding time to loss time. Additionally, using the proposed method, this study shows a timetable of when the number of buses is reduced and clarifies the influence of reducing the number of buses on the user's loss of time.