

利用者需要および収益を加味した 最適バスダイヤ生成手法の構築

浅尾 晃平¹・柳沼 秀樹²・寺部 慎太郎³・海野 遥香⁴・鈴木 雄⁵

¹学生非会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: 7622501@ed.tus.ac.jp

²正会員 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: yaginuma@rs.tus.ac.jp

³正会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: terabe@rs.tus.ac.jp

⁴正会員 東京理科大学助教 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: unoharuka@rs.tus.ac.jp

⁵正会員 東京理科大学助教 理工学部土木工学科 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: yusuzuki@rs.tus.ac.jp

近年、全国的に公共交通の利用者減少による事業者の収益悪化が深刻化している。収益改善に向けた運行の効率化を図るべく、路線の減便や廃止等の施策が行われているが、利用者需要への影響は十分に考慮されているとは言い難い状況にある。本研究は地域内の利用者需要ならびに収益を明示的に考慮したバスダイヤの生成手法を構築する。利用者の交通機関選択をロジットモデルによって記述し、そのパラメータから算出される「期待利用者数」および「期待運賃収入」に着目する。その上で、ある路線のある時刻でバスを運行するか否かを示すバイナリーコードによって表されるバスダイヤを最適化における変数とし、前述の「期待利用者数」および「期待運賃収入」を最大化するようなバスダイヤを組合せ最適化によって生成する。また、車両などのバス事業者側における供給制約を考慮することで、バス事業者にとって実現可能なダイヤの提案を目指す。

Key Words: *Public Transportation, Mathematical Optimization, Logit Model, Diagram Construction*

1. はじめに

近年、全国的に公共交通の利用者減少による事業者の収益悪化や、乗務員の人手不足が深刻化している。そのため、路線の維持が困難になり、特に免許を持っていない利用者の足が失われるといった問題が生じている。昨今では COVID-19 の感染拡大によって事業者内で感染者や濃厚接触者が増加し、乗務員不足が生じて急遽減便を行わざるを得ない状況も見られている。このように公共交通における減便は、収益改善に向けた運行の効率化や人手不足の解消等を図るべく行われているが、その際の利用者需要への影響は十分に考慮されているとは言い難い状況にある。

一方で、スマートフォンの位置情報を用いた需要予測の研究が進んでおり、スマートフォンの普及率も相まって需要予測への活用が高まっている。従来交通需要予測に用いられていたパーソントリップ調査 (PT 調査) は調査頻度が低く、かつサンプル数が限られるため、詳細な移動需要の把握は難しかった。しかし、スマートフォン位置情報データはリアルタイムに逐次更新される上に、利用者の同意を得られる限り多くのサンプルを得ることができるのが特徴といえる。その

ため、今後の技術発展や利用者の動向次第では、ほぼ全ての移動需要を捉えることができるようになると考えられる。

そこで本研究では、地方の中核中核都市を対象に、地域内の利用者需要がある程度既知なもとで適用可能な、利用者需要ならびに収益を明示的に考慮したバスダイヤの生成手法を構築する。その際、バス事業者側における供給制約を考慮することで、実現可能なダイヤの提案を目指す。その構築方法を 3. 節に示し、仮想地域におけるケーススタディ分析を 4. 節に示す。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

(1) 数理最適化によるダイヤ構築に関する研究

数理最適化によって利用者が利用しやすくなるようなバスダイヤの構築を行った研究は多く見られる。高松¹⁾は、他の交通手段との相互乗換を可能にしつつ、同時に停車時間が長くなりすぎないようなダイヤを、混合整数計画問題を解くことによって実現を図った。岸野・喜多²⁾は 1 日における個人の実行可能な時間配分の多様さを示す「アクセシビリティ」の最大値 (自動車利用時のアクセシビリティと同等) に対する比率が、地

区間で同じになるようなダイヤを構築する手法を提唱した。桑野・秋元³⁾は、経路検索システムの検索ログデータから利用者の出発希望時刻を推定し、バス運行時刻との差から求まる損失時間と乗車時間の合計を最小化するようなダイヤを構築する手法を提案した。これらの研究についての詳細な手法については割愛するが、各々違う手法が採用されている。

ここから予め用意したそれぞれのバス運行候補において、バスが運行するか否かを表現するバイナリー変数の組合せを最適化における変数とし、組合せ最適化問題を解くことによってバスダイヤの構築を行った研究を紹介する。大本・小柳・河合⁴⁾は、ヒューリスティック(近似)解法の一つである「タブーサーチ」を用いた最適化によって、利用者需要を満たさないことに課される「ペナルティ値」の総和を最小化するようなダイヤの構築手法を提案した。高山・宮崎⁵⁾は利用者をより多く運べるようなバスネットワークとダイヤを、ヒューリスティック解法の一つである「遺伝的アルゴリズム」を用いた最適化によって同時決定する手法を提案した。後に彼らはこの手法をベースにバスの折り返し等の運行スケジュール⁶⁾や、交通手段選択モデルによる交通手段分担の表現、ならびに運行の効率化⁷⁾を加味した手法も提案している。このように、数理最適化によってバスダイヤを構築する研究は様々なアプローチから盛んになされていることが分かる。

(2) 交通手段選択モデルを用いた利用者需要の感度分析に関する研究

同様に、事業者側の供給変化が利用者需要に及ぼす影響を交通手段選択モデルを用いて分析した研究も多く見られる。高井・青木⁸⁾は、ゾーン運賃やロードプライシング制度の導入による収益や利用者需要への影響を、目的別の交通手段選択モデルを用いて把握した。高根・岩倉⁹⁾は、大規模被災地の復興に応じて土地利用が変化する中で、交通手段選択モデルから求められる利用者・事業者それぞれの評価関数について、各々を最大化できるようなバスネットワークを構築する手法を提案した。吉羽・小林¹⁰⁾は、スマートフォンの位置情報とバス運行情報を照らし合わせてバス需要を把握すると同時に、そこで得られたデータから路線バス選択モデルを構築し、運賃や待ち時間等の LOS(Level of Service) を変化させた場合の分担率の変化を分析した。このように、交通手段選択モデルを用いた利用者需要の感度分析の研究に関しても、様々なアプローチから盛んに行われていることが分かる。

(3) 本研究の位置づけ

このように、数理最適化によるバスダイヤの構築や、交通手段選択モデルを用いた利用者需要の感度分析に関する研究は、様々な観点から盛んに行われているものの、交通手段選択モデルを用いて利用者需要への影響を加味しつつ詳細なバスダイヤを構築する研究はあまり見られない。また、高山・宮崎⁶⁾や岸野・喜多らの研究²⁾のように、バスダイヤの最適化の研究の中には折り返し等の運行スケジュールを加味したものもあるが、車両が終点に着いてすぐに折り返す等、十分現実的でない部分も散見される。

本研究は大本・小柳・河合⁴⁾の手法や高山・宮崎⁵⁾の手法を参考にしつつ、交通手段選択モデル(Logit Model)から求まる期待利用者数ならびに期待収益を最大化するようなダイヤを、組合せ最適化によって構築する。その際終点でのバスのストック(台数)や、折り返し時間を制約に加えることによって、車両や乗務員の運行スケジュールを考慮したものとする。

3. ダイヤ生成モデルの構築

(1) データ概要

本研究における最適化手法は対象地域内でのトリップが既知であるもとで適用可能としているため、「対象地域・対象時間のトリップデータ」を必要とする。ここでのトリップデータには、出発地・到着地、利用交通手段、各交通手段の利用可能性(またはそれを推定する手掛かりとなる個人属性)が入っている必要がある。また、地域内の移動需要をベースにダイヤを構築する関係上、可能な限り現況に近く、かつ数の多いトリップが記されたものが望ましい。したがって本研究で用いるトリップデータは PT 調査というよりは吉羽・小林¹⁰⁾の研究にあるようなスマートフォンの位置情報データを想定している。

(2) ダイヤの表現方法

本研究では大本・小柳・河合⁴⁾ならびに高山・宮崎⁵⁾の研究にあるように、予め用意したそれぞれのバスの運行候補において、バスが運行するか否かを表現するバイナリー変数の組合せを、最適化における変数として導入する。4. 節のケーススタディでは、運行時刻が等間隔のものをを用いているが、必ずしもそうである必要はない。

運行候補に含まれるバス運用 o を運行するか否かの変数を以下のように定義する。

$$x_o = (0, 1) \quad (1)$$

バス運用 o が運行する場合は 1、運行しない場合は 0 とし、これを運行候補に含まれるバス運用数の分だけ生

運行候補リスト

運用 バス停	1	2	3	4	5
1	8:00	8:05	8:10	8:15	8:20
2	8:06	8:11	8:16	8:21	8:26
3	8:12	8:17	8:22	8:27	8:32
4	8:18	8:23	8:28	8:33	8:38
5	8:24	8:29	8:34	8:39	8:44

×

バイナリー変数				
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	0	1	0	1

↓

生成ダイヤ

運用 バス停	1	2	3	4	5
1	8:00	8:05	8:10	8:15	8:20
2	8:06	8:11	8:16	8:21	8:26
3	8:12	8:17	8:22	8:27	8:32
4	8:18	8:23	8:28	8:33	8:38
5	8:24	8:29	8:34	8:39	8:44

運行なし
運行なし

図-1 ダイヤ生成のイメージ図

成する。このようなバイナリー変数 x_o を用いてダイヤを生成するイメージ図を図-1 に示す。

(3) モデルの定式化

a) パラメータの定義

本研究の最適化を説明するにあたって必要なパラメータの定義を行う。トリップデータから得られるパラメータを表-1 に、LOS データから得られるパラメータを表-2 に、バス運用に関わるパラメータを表-3 に示す。

b) 目的関数の定義

本研究における目的関数はそれぞれ利用者数と収益(本研究では運賃収入のみを考慮)の期待値である「期待利用者数」および「期待収益」の最大化と設定する。これらは交通手段選択モデルによって以下のように定

表-1 トリップデータから得られるパラメータ

パラメータ	意味
I	個人のリスト
$i(\in I)$	個人
Z	出発地・到着地(バス停)のリスト
$z_{io}, z_{id}(\in Z)$	各個人の出発地・到着地
C	各個人の選択肢集合
$c(\in C)$	選択肢

表-2 LOS データから得られるパラメータ

パラメータ	意味
$cost_{c,z_{io}z_{id}}$	選択肢 c 利用時に $z_{io} \rightarrow z_{id}$ 間にかかる費用
$time_{c,z_{io}z_{id}}$	選択肢 c 利用時に $z_{io} \rightarrow z_{id}$ 間にかかる乗車時間
$wait_{bus,z_{io}z_{id}}$	バス利用時に $z_{io} \rightarrow z_{id}$ 間にかかる待ち時間

表-3 バス運用に関わるパラメータ

パラメータ	意味
O	バス運用リスト
$o(\in O)$	バス運用
$O_{z_1 z_2}(\in O)$	z_1 発 z_2 行きのバスのリスト
n_o	全体本数
$z(\in Z)$	バス停・ゾーン番号
$Z_{l_s}(\in Z)$	終点バス停のリスト
b_o	バス運用 o に入るバス車両
$S_{b,z \in Z_{l_s}}$	終点バス停 z におけるバスストック(台数)
$S_{I,b,z \in Z_{l_s}}$	終点バス停 z における初期のバスストック(台数)
t_{oz}	バス運用 o がバス停 z に発着する時刻
r_{min}	最小折り返し時間

式化できる。

V_{ic} を個人 i の選択肢 c の効用、 α, β をパラメータ、とすると、交通手段選択モデルの効用関数は以下のように定義される。

$$V_{ic} = \alpha_c + \frac{\beta_{cost}}{100} \cdot cost_{c,o_i d_i} + \frac{\beta_{time}}{10} \cdot (time_{c,o_i d_i} + wait_{c,o_i d_i}) \quad (2)$$

上式を用いて P_{ibus} を個人 i がバスを選択する確率は以

下のように計算できる.

$$P_{ibus} = \frac{\exp(V_{ibus})}{\sum_{c \in C} \exp(V_{ic})} \quad (3)$$

これらの式より, バスダイヤが変更されると個人の待ち時間が変化し, バスの効用および選択確率も変化するという現象が記述できる.

ここで, 交通手段選択モデルから算出される選択確率を「利用しない=0, 利用する=1 としたとき, ある個人がバスを利用する・しないかの期待値」と解釈すると, 目的関数の 1 つである「期待利用者数」の最大化は以下のように定義できる.

$$\text{Maximize} \sum_{i \in I} P_{ibus} \quad (4)$$

同様に, ある個人から得られる期待収益(運賃収入)は, 選択確率にバス運賃をかけたものと定義できる. したがって目的関数の 1 つである期待収益の最大化は以下のように定式化できる.

$$\text{Maximize} \sum_{i \in I} (P_{ibus} \cdot \text{cost}_{bus, o_i, d_i}) \quad (5)$$

ここまでの流れを踏まえると, 本研究で設定している目的関数の値は, バスダイヤの変更に伴って変化すると仮定できる. この仮定を踏まえて最適化計算を行う.

c) 制約条件の定義

本研究の最適化では車庫や終点バス停にいるバス車両のストック等, 運行に関連する制約を考慮する.

まず, 全体本数に関する制約を定義する. 本研究ではあらかじめ全体の本数 (=1 の数) を制約として定め, 一定数の 0 と 1 を並び替えるような形で表現している. これは本数が少なすぎる, または多すぎるダイヤが生成されることを防ぐことや, 試す組合せの数を制限するためである. この制約を定式化すると以下のようになる.

$$\sum_{o \in O} x_o = n_o \quad (6)$$

次にバスのストック関連の制約について説明する. ここでの制約には, 「終着バス停到着後に最低限の待機時間が経過しないと折り返せない」といった制約が含まれる. これは折り返し準備や, 乗務員の休憩, 遅延時の回復等を考慮するためである. この時間を「最小折り返し時間 r_{min} 」とする. 上記を踏まえつつ, $o \in O_{z_1 z_2} (z_1, z_2 \in Z_{I_s})$ としてストック関連の制約を定式化すると以下のようになる.

1. 始発バス停 z_1 からバス b_o が出発する時刻 t_{oz_1} に, 始発バス停のストック S_{b, z_1} からバス b_o が削除される.

$$t = t_{oz_1} \rightarrow S_{b, z_1} = S_{b, z_1} - b_o \quad (7)$$

2. z_2 に b_o が到着してから最小折り返し時間 r_{min} が経過した時刻 $t_{oz_2} + r_{min}$ に, 終着バス停のストック

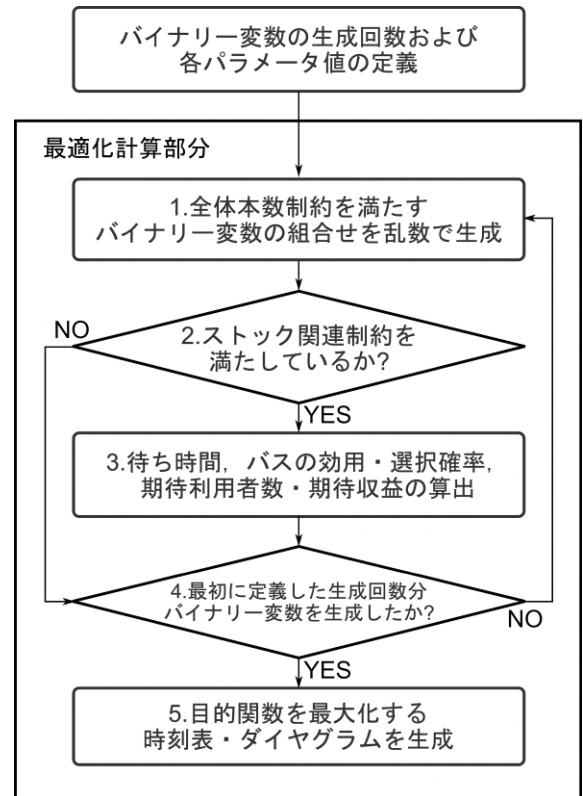


図-2 最適化のフローチャート

クにバス b_o が追加される.

$$t = t_{oz_2} + r_{min} \rightarrow S_{b, z_2} = S_{b, z_2} + b_o \quad (8)$$

3. 始点・終着バス停における利用可能ストック $S_{b, z \in Z_{I_s}}$ 内のバス台数は必ず 0 以上となる.

$$n(S_{b, z \in Z_{I_s}}) \geq 0 \quad (9)$$

(4) 最適化の流れ

本研究における最適化の流れを図-2のフローチャートに則って説明する. 最適化計算に入る前に予めバイナリー変数の生成回数と, 全体本数 n_o ・終点バス停における初期ストック $S_{I, b, z \in Z_{I_s}}$ ・最小折り返し時間 r_{min} といった制約条件に関する各パラメータの値を定義しておく. ここから最適化計算の中身の説明を行う. 各項目の番号はフローチャート内の番号に対応する.

1. 全体本数制約式 (6) を満たすようなバイナリー変数 (式 (1)) の組合せを乱数で生成し, 同時に図-1 に示した方法でダイヤも生成する.
2. 1. で生成したダイヤが, 所定の初期ストック $S_{I, b, z \in Z_{I_s}}$ ・最小折り返し時間 r_{min} のもとで「実行可能」, つまりストック関連の制約式 (7,8,9) を満たすかどうかを確認する. 実行可能な場合のみ 3. に進み, そうでなければ 4. に進む. この手順で処理を行うことによってコンピュータに負荷のか

かる 4. の計算を最小限にすることができる。

3. トリップデータにおける出発時間から、目的地に行くバスのうち、最も早いバスの出発時間までの時間を待ち時間と定義し、バスの効用・選択確率および目的関数の値を式 (2,3,4,5) を用いて求めていく。求めた平均待ち時間および目的関数 (期待利用者数・収益) は、1 で生成したバイナリー変数の組合せとともに記録する。
4. あらかじめ定義した所定の生成回数分だけバイナリー変数の組合せを生成したか否かを確認する。生成回数に達していない場合は 1. に戻り、再度バイナリー変数の組合せを生成する。生成回数に達した場合は 5. に進む。
5. 期待利用者数・収益それぞれを最大化するようなダイヤ・ダイヤグラムを生成する。具体的な生成例は次節にて示すとする。

4. 仮想地域でのケーススタディ分析

(1) 仮想地域・路線・時間の設定

本研究は地方の中核中核都市を対象としているため、仮想地域も同様の設定とする (以下この都市を「A 市」と呼ぶ)。本研究における対象路線は A 市随一のドル箱路線で、通勤・通学で使う利用者が多数いるような 1 路線とする。その路線には中心にバス停が 1 つあるゾーンが 5 つ等間隔に並んでいるとする。したがって待ち時間以外の LOS は、1 リンクあたり一定と設定する。これらのゾーンには表-4 に示すような設定を付与している。この路線に並行する鉄道・バス路線はどの区間にも存在しないとする。

対象時間は通勤・通学利用者が多い 6 時～9 時と設定する。現況では上下線ともに 6 時台は 30 分ヘッド・7～8 時台は 15 分ヘッドでバスが走っているとする。このダイヤを「現況ダイヤ」と呼ぶ。

(2) 仮想トリップデータの生成

A 市の仮想路線で最適化を行うにあたり、3. 節の必要データのところで述べたようなトリップデータを仮想的に生成する。このトリップデータには出発地・到着地、出発時間、各交通手段の利用可能性、利用交通手段のデータを入れている。

このデータは以下に示すように生成することによって実際のトリップに近いデータを擬似的に生成している。出発地・到着地は (1) 節で定義した各ゾーンの設定から設定した重み付き乱数によって生成した。出発時間は対象時間を 30 分毎の 6 つの時間帯に分け、各時間帯別に重みを付与した乱数で生成することによって、時間帯によるトリップ数の変化を表現した。利用可能性に

表-4 仮想路線における各ゾーンの設定

ゾーン番号	設定	出発重みづけ	到着重みづけ
1	A 市中心部	2	4
2	中規模住宅地	2	2
3	高校所在地	2	2
4	A 市有数のベッドタウン	3	1
5	バス営業所のある郊外	1	1

表-5 交通手段選択モデル推定結果

変数	推定値	t-値	
定数項 (自転車)	-0.392	-4.69	**
定数項 (バス)	-0.452	-2.05	*
定数項 (徒歩)	-1.58	-8.23	**
費用	-0.483	-4.99	**
総所要時間	-0.816	-12.8	**
尤度比	0.467		

+ :10%有意 * :5%有意 ** :1%有意

については徒歩・バスは全員利用可能とし、自転車・自動車はある確率で利用不可能になるように設定した。また、ゾーン 3 (高校所在地) 到着のトリップについては、通学のトリップを仮定し、時間帯別の重みや自動車の利用可能性の設定について別の基準を導入している。利用交通手段は特定の交通手段選択モデルの効用関数式を用いて算出した効用値に、正規分布に基づいて生成した乱数を足し合わせ、最終的に効用値が最大となる交通手段を利用交通手段とした。このようなトリップデータを 5000 サンプル生成し、そのうち内々トリップを除いて最終的に 3999 サンプルとなった。

(3) 交通手段選択モデル推定結果

(2) で生成したトリップデータをもとに、交通手段選択モデル (Logit Model) のパラメータ推定を行う。ここで、本研究における交通手段選択モデルの仮定は以下に示す通りとする。

1. 選択肢集合は (徒歩・自転車・自動車・バス) の 4 つとする。
2. 徒歩は全員利用可能とする。
3. 自転車・自動車の利用可能性については重み付き乱数で個人ごとに設定する。

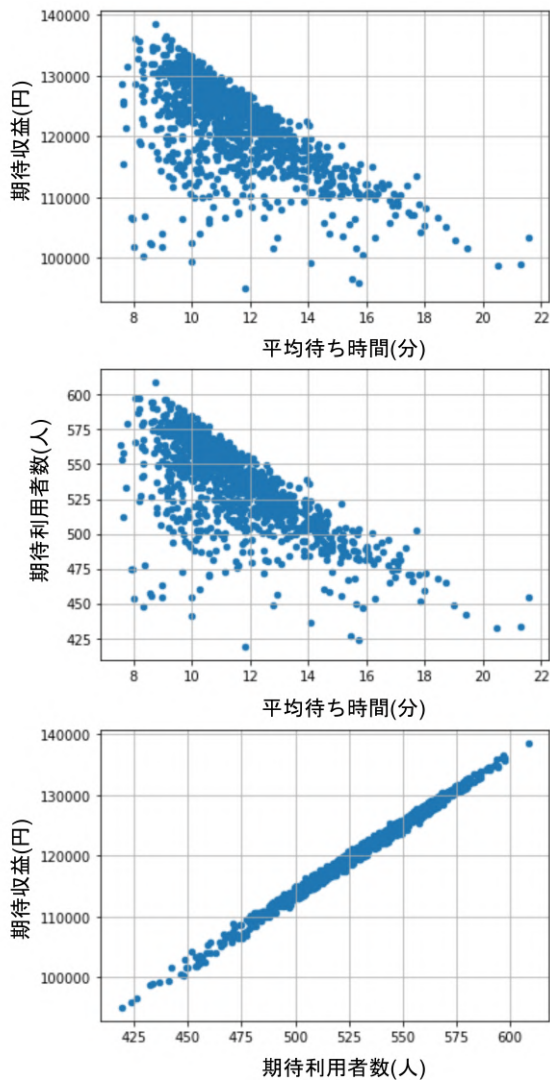


図-3 平均待ち時間・期待利用者数・期待収益の関係

表-6 本数・トリップ数

方面	現況ダイヤ 本数(本)	最適ダイヤ 本数(本)	トリップ数
ゾーン 1	11	12	2672
ゾーン 5	11	10	1327
合計	22	22	3999

4. バスの利用可能性は基本全員利用可能としている(2)節より)が、対象時間内に乗車可能なバスが存在しない場合は利用可能性なしとなる。

効用関数を 3. 節で示した式 2 のように定義すると、パラメータ推定結果は表-5 のようになる。どの変数も 5% 有意で、符号も現実と合致しているといえる。また、尤度比は 0.467 となっており、モデルは十分適合しているといえる。

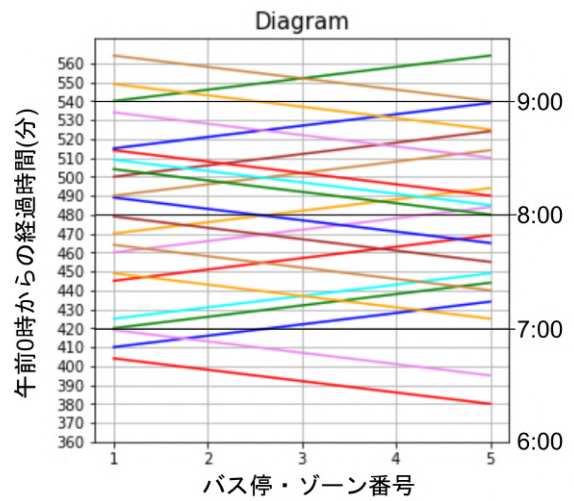


図-4 最適ダイヤにおけるダイヤグラム

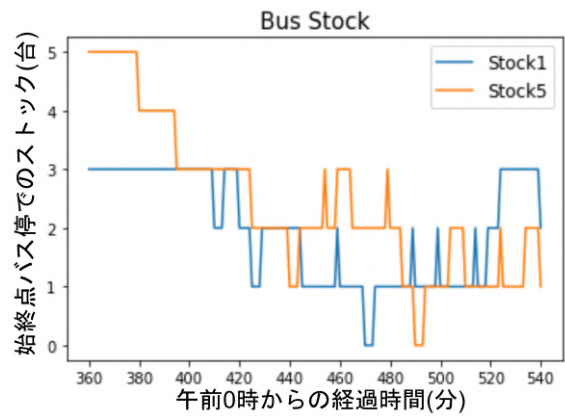


図-5 終点でのストックの推移

(4) 最適ダイヤの生成

3. 節で説明した手法や、(2) 節で生成した仮想データ、(3) 節で推定した交通手段選択モデルを用いて、目的関数を最大化できるようなダイヤを構築する。この時、バイナリー変数の生成数は 10000、全体本数を現況と同じ 22 本、バス停 1 における初期ストックを 3 台、バス停 5 における初期ストックを 5 台、最小折り返し時間を 10 分と設定した。

平均待ち時間、期待利用者数、期待収益の関係を図-3 に示す。ダイヤによって期待利用者数には約 200 人、期待収益には約 4 万円の差が出ることが分かる。また、期待利用者数-期待収益のグラフはほぼ一直線上にプロットされているのに対し、待ち時間-期待収益および待ち時間-期待利用者数のグラフではそうになっていない。これは利用可能性無しと判定された個人によるものであると考えられる。

このケースにおいて、期待利用者数および期待収益

表-7 利用者数・収益の比較

	現況ダイヤ (観測値)	最適ダイヤ (期待値)
利用者数(人)	610	608.9
収益(円)	135140	138450

表-8 バス運用別の乗車人数の比較

	現況ダイヤ (観測値)	最適ダイヤ (期待値)
平均値(人)	27.7	27.7
標準偏差(人)	13.3	12.9

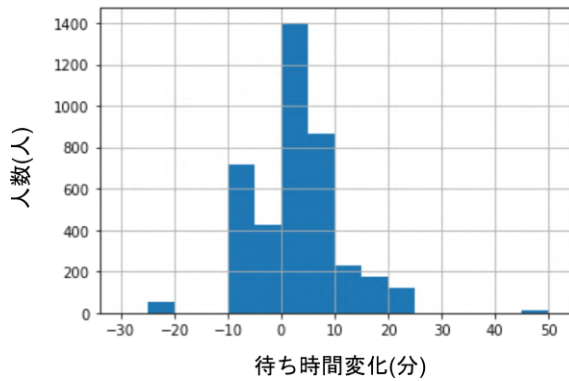


図-6 現況→最適ダイヤにおける待ち時間変化

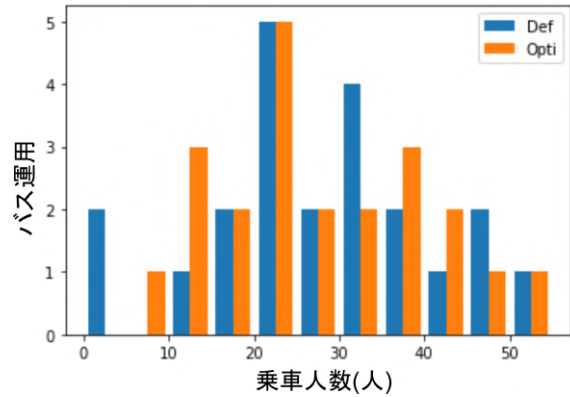


図-7 現況・最適ダイヤにおけるバス運用別の乗車人数

を最大化するダイヤは同じダイヤであった。この時のダイヤを「最適ダイヤ」と呼ぶ。

現況・最適ダイヤにおける本数と、上下線別トリップ数を表-6に示す。元々のトリップ数がゾーン5方面よりゾーン1方面の方が多くなっていることに伴い、最適ダイヤではゾーン1方面の方がわずかに本数が多くなっていることが分かる。この時のダイヤグラムを図-4に示す。ここで、縦軸は午前0:00からの経過時間、横軸はバス停、色はそれぞれ単一の車両運用を表している。このダイヤグラムより、6時台より7時台・8時台にバスが多く走っていることや、各車両が終点到着後一定時間経過してから折り返す運用が組まれていることが分かる。各終点におけるストックの推移を図-5に示す。ここで、縦軸は各バス停におけるストック、横軸は午前0:00からの経過時間を示している。いずれのストックにおいても常に0以上を維持していることが分かる。

(5) 最適ダイヤの比較・評価

ここで、「最適ダイヤ」を導入した時の効果について、「現況ダイヤ」と比較を行うことによって評価する。

トリップデータにおける選択結果・バス運賃から求めた現況ダイヤにおける利用者数・収益と、最適ダイヤにおける期待利用者数・収益を表-7に示す。この表より、現況ダイヤから最適ダイヤに変更しても、利用者数及び収益にほとんど変化が見られないことが分かる。現況ダイヤから最適ダイヤに変更した時に生じる各個人のバス待ち時間における変化の分布を示したヒスト

グラムを、図-6に示す。ここで、待ち時間変化の平均値および中央値を求めてみると、それぞれ+0.41(分)と0(分)となり、待ち時間が増大側にも減少側にも変化しているとは言えない結果となった。また、最適ダイヤ導入時に待ち時間が50分近く増大するようなケースがわずかながら存在していることが分かる。

現況・最適ダイヤそれぞれにおけるバス運用ごとの乗車人数の平均値および標準偏差の比較表を表-8に、ヒストグラムを図-7に示す。比較表より、平均値は変わっていないことや、わずかに標準偏差が小さくなっていることが分かる。また、ヒストグラムより現況ダイヤで見られた乗車人数が5人以下の運用が最適ダイヤでは見られないことが分かる。

5. おわりに

本研究では利用者需要および収益、ならびに終点での折り返しを考慮したバスダイヤを交通手段選択モデルおよび数理最適化を用いて生成する手法の検討を行った。ダイヤによって利用者数・収益に差が出ることは示せたものの、ケーススタディにおいて現況ダイヤと最適ダイヤの比較を行った際に両者に大きな差は見られず、本手法を用いて構築したダイヤの有意性が示せたとは言い難い結果となった。この原因として元々の「上下線ともに6時台は30分ヘッド・7~8時台は15分ヘッドのダイヤ」も利用者数・収益が高く見込めるダイヤの一つであることや、解の探索が不十分な故にさ

らに高い利用者数・収益が見込めるダイヤを見落とし
てしまっていることが挙げられる。また、最適化本体
や交通手段選択モデルにおける仮定についても、モデ
リングしやすくするために単純化しており、現実に
即しているとは言い難い部分が多くあると考えられる。
したがって今後の課題として、適用路線設定の見直し
や理論的かつ効率的な解の探索方法の導入、収益算出
時におけるストックや本数で決まる費用の組み込みや、
路線が複数あるケースへの拡張等が挙げられる。

参考文献

- 1) 高松瑞代: バス時刻表の最適化, オペレーションズ・リサーチ = Communications of the Operations Research Society of Japan : 経営の科学 60 (9), pp. 512-516, 2015
- 2) 岸野啓一, 喜多秀行: 活動機会の公平性を考慮したバスダイヤの評価指標, 社会技術研究論文集, Vol.7, pp.152-161, 2010.
- 3) 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バス時刻表の設計に関する研究, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.75, No.6(土木計画学研究・論文集第 37 巻), pp.L501-L511, 2020.
- 4) 大本高志, 小柳淳二, 河合 一: 過疎地におけるバス時刻最適化問題, 数値解析研究所講究録, No.1682, pp.156-162, 2010.
- 5) 高山純一, 宮崎耕輔: バスダイヤを考慮した最適バス路線網再編計画策定に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.13, pp.827-836, 1996.
- 6) 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, No.32, pp.547-552, 1997.
- 7) 高山純一, 中山晶一郎, 遠藤 玲, 宮崎耕輔, 戸瀬 暖: 機関分担を考慮したバス路線網策定システムの構築に関する研究, 交通工学研究発表会論文報告集 / 交通工学研究会 編, No.27, pp.197-200, 2007-10.
- 8) 高井裕貴, 青木保親, 葉 健人, 土井健司, 杉山郁夫: 異種交通モード間での異種交通モード間でのゾーン運賃導入の効果, 土木計画学研究・講演集, Vol.63, CD-ROM, 2021
- 9) 高根大毅, 岩倉成史: 大規模被災地の復興過程に応じたバス路線再編のための計算手法, 土木計画学研究・講演集, Vol.65, CD-ROM, 2022
- 10) 吉羽 崇, 小林亮博, 中菅章浩, 南川敦宣, 富岡秀虎, 森本章倫: スマートフォン位置情報データを活用したバス需要予測に関する研究, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.76, No.5(土木計画学研究・論文集第 38 巻), pp.L767-L776, 2021.

(2022/9/30 受付)

CONSTRUCTION OF OPTIMUM BUS SCHEDULE CONSIDERING DEMAND AND REVENUE

Kohei ASAO, Hideki YAGINUMA, Shintaro TERABE, Haruka UNO, Yu SUZUKI

In recent years, the decrease in the number of users of public transportation, has worsened the profitability of business operators. In order to improve the efficiency of operations to improve profitability, measures such as reducing or abolishing routes are being implemented. However, it is difficult to say that the impact on user demand has been fully considered. This research builds a method of generating a bus operation schedule that explicitly considers user demand and revenue within a region. We describe users' mode of transport selection by Logit Model, and pay attention to "expected number of users" and "expected fare revenue" calculated from the parameters. In addition, the bus operation schedule represented by the binary code, that indicates whether or not the bus will operate at a certain time on a certain route, is used as a variable in optimization, and we generate a bus operation schedule which maximizes "expected number of passengers" and "expected fare revenue" by combinatorial optimization. In addition, we propose a feasible operation schedule by considering supply constraints on the bus operators' side such as vehicles.