

複数交通モード間のシームレス化に向けた
顧客需要指向の鉄道ダイヤ修正技術に関する一検討
A Study of Train Timetable Optimization Method using Passenger Demand
for Seamless Multi-modal Transportation

賀沢 唯[†] 小林 雄一[†] Wisetjindawat, Wisinee[‡] 福丸 諒[†]
Yui Kazawa Yuichi Kobayashi Ryo Fukumaru

1. はじめに

近年、鉄道や道路交通などのモビリティサービスをシームレスに接続して 1 つのサービスとして提供する MaaS(Mobility as a Service)が注目されている。その背景の一つとして、人口減少に伴うマーケットの長期的縮小という困難の中で、いかにモビリティサービスの質を高め魅力を増しつつ持続可能な事業を実現するかが重要な課題となってきたことが挙げられる[1][2]。

MaaS は現在、世界中で展開されており、公共機関、企業団体、産学連携団体など様々な団体が積極的に推進している。日本においても、公共交通分野におけるオープンデータ化を推進し、誰もがストレスフリーで移動できる環境の実現をめざす取り組みが行われている[3]。

公共交通ネットワーク全体の利便性向上のためには、複数路線の結節点における連携が重要となる[4]。文献[2]では、鉄道とバスの円滑な乗継を保証するバス時刻表の設計方式を提案している。また、鉄道の運行乱れ時において鉄道ネットワーク全体を考慮して車両間の接続を確保するか否かを判断する手法が提案されている。

これらの先行研究に対し、本研究では周辺交通機関の運行状況および旅客の移動需要を考慮して、鉄道事業者が取り得るオペレーションの中から最適解を動的に推定する手法およびこれを実現する交通システムアーキテクチャを提案する。また、バス遅延に呼応した鉄道の出発時刻調整をユースケースとして、旅客間の不平等を平準化しつつ移動コスト総和を低減するオペレーション最適化方式を提案する。

本稿の 2 章では複数交通事業者間の連携における課題とアプローチについて述べる。3 章では本稿で対象とする最適化問題および提案方式について述べる。4 章ではオープンデータを用いた提案方式の有効性検証について述べる。

2. 課題とアプローチ

2.1 複数交通事業者の連携を実現する交通システムアーキテクチャ

複数交通事業者の連携を実現するためには、各交通事業者の運行状況および旅客の移動需要に関する情報を取得し、最適解を導出する仕組みが必要である。これを実現する交通システムのアーキテクチャの一例を図 1 に示す。

図 1 の交通システムは、チケットシステム、ダイヤ変更支援システム、運行管理システムから構成される。チケットシステムとは、旅客が交通機関の利用区間

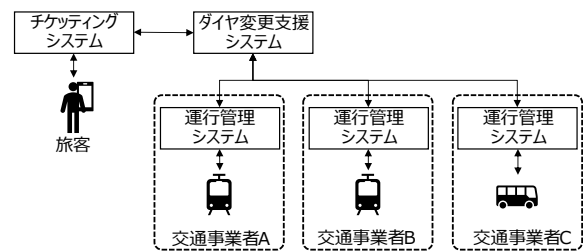


図 1 交通システム

を入力し運賃を支払うシステムである。運行管理システムとは、各交通事業者が運営する路線を運行する車両 (e.g. 鉄道、バス) の運行計画および運行状況を管理するシステムである。ダイヤ変更支援システムは、各交通手段が取り得るオペレーションの中から、最適な組み合わせを探索し結果を提示するシステムである。

本稿では図 1 に示した交通システムを前提とし、ダイヤ変更支援システムによって交通ネットワーク全体を考慮したオペレーション最適化を行うものとする。次節以降では、オペレーション最適化にあたり考慮すべき点と最適化手法について検討を行う。

2.2 旅客間の不平等を考慮したオペレーション最適化

鉄道の運行乱れ時におけるオペレーション最適化に関しては、これまでにも様々な研究が行われている。文献[5][6]では、接続元列車が一定時分遅延した場合に、接続先車両を待たせて接続をとるか、あるいは接続元列車の到着を待たずに接続先車両を発車させるか、という接続判断を最適化する手法を提案している。

接続判断を行う際は、旅客の不効用を最小化するだけでなく、旅客間の不平等も考慮する必要がある[6]。接続を確保する場合、乗継客の利便性は確保されるが、接続先列車には遅延が生じ、接続先列車に乗車済の利用者にとって不便になる。逆に、接続を行わない場合は乗継客にとって不便になる。そのため文献[6]では、接続判断を行う時点における旅客間の不平等を平準化することを目的として、不効用の平均と分散を用いた評価関数を用いて最適化を行う手法を提案している。

一方、旅客が交通機関を利用する際の時間帯、出発駅、目的駅のパターンであるトリップパターンに関する研究[7][8][9]によると、交通機関を利用する旅客のうち、一定割合の旅客は決まった時間帯にそれぞれの出発駅を出発し、決まった目的駅に向かうことが示唆されている。

したがって、文献[5][6]の既存手法を用いて最適化を行った場合、各車両の乗車人数および旅客 OD がパターン化されているため「ある曜日・時間帯においてはいつも遅れ

[†] (株) 日立製作所 : HITACHI, LTD.

[‡] HITACHI EUROPE, LTD.

てくる車両とその接続判断を迫られる車両が発生する」という状況が起こり得る。

例えば、図2のような路線ネットワークが存在し、車両3が接続元車両、車両1および車両2が車両3の接続先車両となるダイヤが存在したとき、特定の曜日・時間帯において常に車両3の遅延が発生し、車両1および車両2が接続判断を迫られるというケースが想定される。

上記のようなケースで、特に各路線が異なる交通事業者によって運営されている場合、ある交通事業者が運営する路線の旅客のみが不利益を被ることになる。これは、その路線の顧客満足度低下につながるため望ましくない。複数交通事業者による連携を実現するためには、各路線を利用する旅客が被る不利益を平準化する必要がある。なお、ここで不利益とは、移動時間、乗継回数、運賃などの条件が、旅客が当初意図していた経路よりも悪くなることをさす。

本研究では、長期的に見たときに各旅客が被る不利益を平準化することを目的として、分散協調スケジューリング[10]のコンセプトを公共交通分野におけるオペレーション最適化に応用する。ここで、分散協調スケジューリングとは、KPIが異なる複数の主体が存在する場合において、全体KPIを維持しつつ長期的に見たときに全ての主体に利益がもたらされるよう計画を調整する技術である。

分散協調スケジューリングは、ある計画の調整の結果として不利益を被った自律個に対し優先ポイントという仮想マネーを与える仕組みを内包している。計画の調整を行う際に各主体が持つ優先ポイントの多寡を考慮することで、特定の主体のみが不利益を被ることを避けている。

本稿では、分散スケジューリングの「利害が発生する主体に対し、不利益に応じたポイントを与える」という仕組みを接続判断に適用したオペレーション最適化方式を提案する。提案方式では、接続判断の結果として不利益を被った旅客に対し、不利益に応じたポイントが付与する。また、接続判断の際に各旅客の累計ポイントを考慮する。これにより、各旅客に生じる不平等を長期的に見て平準化させる。

3. 提案方式

3.1 問題設定

本稿では、バス遅延をトリガーとして、接続駅における乗継失敗箇所を推定し接続先車両の出発時刻調整が必要か否かを判定する問題をユースケースとする。図2に示した路線1が鉄道事業者A、路線2が鉄道事業者B、路線3がバス事業者Cにより運営され、路線1と路線2は主要駅Aと主要駅Eの区間を並走するものとする。このとき、車両3(=バス)が遅延し、車両1および車両2(=鉄道)の接続判断が必要となるケースを想定する。

上記ケースの場合、(1) 鉄道事業者Aが出発時刻調整を行う、(2) 鉄道事業者Bが出発時刻調整を行う、(3) 鉄道事業者AとBがともに出発時刻調整を行う、(4) 鉄道事業者AとBのいずれも出発時刻調整を行わない、という4パターンのオペレーションの組み合わせが考えられる。ここで、各鉄道事業者が出発時刻調整を行うか否か、というオペレーションの組み合わせをダイヤ変更オプションと定義する。

次節では、最適ダイヤ変更オプションを導出する処理フローについて述べる。また、ダイヤ変更オプションの評価関数の考え方について述べる。

3.2 分散協調スケジューリングを応用した

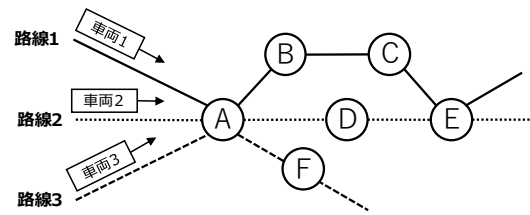


図2 路線ネットワーク

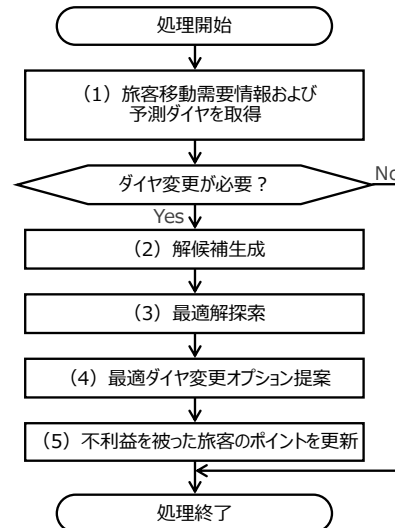


図3 処理フロー

オペレーション最適化方式による出発時刻調整

図3に提案方式の処理フローを示す。はじめに、(1) 旅客移動需要情報および予測ダイヤを取得する。ここで、旅客移動需要情報とは、各旅客のOD予測である。また、予測ダイヤとは、各車両の各駅における予測到着時刻である。車両の到着遅れにより接続が確保できなくなる、など予測ダイヤにおいてダイヤ変更が必要な箇所がある場合、(2) ダイヤ変更オプションを生成する。次に、(3) 生成したダイヤ変更オプションの評価値を計算し、最適ダイヤ変更オプションを導出する。次に、(4) 導出した最適ダイヤ変更オプションを鉄道事業者に対して提案する。最後に、(5) 最適ダイヤ変更オプションを実施することで不利益を被る旅客を抽出し、各旅客に対して不利益の度合いに応じたポイントが付与する。

ここで手順(5)における不利益とは、各車両が定刻通り運行した場合よりも目的地に到着する時間が遅くなることと定義する。なお、各旅客に付与されるポイントの累計は、旅客を一意に特定可能な情報(e.g. チケットシステムのアカウント情報)と紐づけて記憶する。

$$F_c = \alpha * \sum_i C_i + \beta * V \quad \dots \quad \text{Eq.1}$$

C_i : 旅客 i の移動コスト
 V : ポイントの分散
 α, β : 重み

手順(3)においてダイヤ変更オプションを評価するための評価関数はEq.1のように定義し、 F_c の値が最小となるダイヤ変更オプションを最適ダイヤ変更オプションとする。

ここで旅客の移動コストとは、例えば旅客の不効用である。旅客のポイントの分散とは、ダイヤ変更オプションを評価する際に移動コストを考慮する対象となる旅客の各々に対して過去に与えられたポイントの累計の分散である。

Eq.1 の評価値は、その時点における旅客の移動コスト総和と旅客間の累計ポイントの不平等が小さいほど小さくなる。したがって、評価値が最小となるダイヤ変更オプションを選択することで、旅客の移動コストを考慮しつつ各旅客に生じる不平等を平準化できると期待される。

4. 評価

4.1 実験

4.1.1 概要

提案方式の有効性を検証するため、X 市における公共交通機関の駅発着時刻オープンデータ¹を用いて評価を行った。なお本稿では特に次の路線に着目した。

- 鉄道路線 A
- 鉄道路線 B
- X 市内循環バス

鉄道路線 A および B はいずれも都市間を結ぶ長距離路線であり、X 市内の主要駅である駅 1、準主要駅である駅 2 に停車する。X 市内循環バスは多数の路線が存在するが、本稿では駅 1 を発着する路線のみ考慮する。

本実験では、駅 1 において X 市内循環バスから鉄道路線 A または B への乗継を行い、駅 2 へ向かう旅客を想定する。また、図 1 に示したダイヤ変更支援システムが、「バスの遅延が発生した際に鉄道路線 A または B いずれかの車両、または両方の出発時刻を調整させてバスとの接続を確保する必要があるか否か」を判定すると想定する。

4.1.2 検証シナリオ

図 4 は鉄道路線 A、鉄道路線 B、X 市内循環バスの駅 1 および駅 2 における着発時刻を図示したものである。なお、b1372、r117、r143、r40 はそれぞれ駅着発時刻オープンデータにおけるバス・列車の車両を一意に識別するための ID であり、b1372 はバス、r143 および r40 は鉄道路線 A、r117 は鉄道路線 B の車両である。本稿では、図 4 のように X 市内循環バス b1372 が 10 分遅れて駅 1 に到着する予測ダイヤを生成し実験に用いる。また、このとき r117 および r143 のいずれも接続確保のための出発時刻調整を行わない場合、b1372 に乗車し駅 1 で鉄道に乗り継いで駅 2 へ向かう旅客は後発の r40 に乗車し待ち時間が 4 分から 15 分に増加すると仮定する。

表 1 に示したのは検証用に生成する予測 OD における b1372、r117、r143 の各車両の乗車人数である。表 1 の(i)から(iii)のように設定した 3 種類の予測 OD を生成して実験に用いる。提案方式によって「r117 が出発時刻調整」、「r143 が出発時刻調整」、「r117 と r143 が出発時刻調整」、「出発時刻調整しない」の 4 つの選択肢の中から、各車両に乗車している旅客の移動コストと旅客ポイントの両方を考慮した解が導出されるかを検証する。なお、本稿

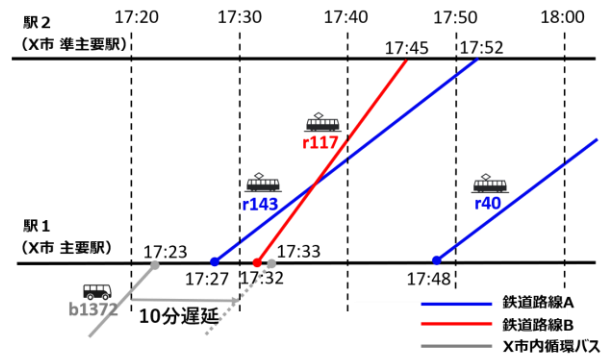


図 4 検証用データ

表 1 予測 OD データ

	(i)	(ii)	(iii)
b1372からr117またはr143に乗り継ぐ旅客	30人	5人	30人
駅1においてr117に乗車済の旅客	5人	30人	15人
駅1においてr143に乗車済の旅客	5人	30人	5人

では駅着発時刻オープンデータ中の b1372、r117、r143 以外の車両に乗車する旅客は考慮しないものとする。

4.2 結果と考察

図 5 に、表 1 の(i)から(iii)の予測 OD データを用いて接続判断を 100 回行った結果を示す。図 5 に示した折れ線グラフの縦軸は最適解として選択されたダイヤ変更オプションの内容、横軸は試行回数を表している。

なお評価値は Eq.1 を用いて算出し、それぞれの旅客の移動コストは以下のように定義した。

なお評価値は Eq.1 を用いて算出し、それぞれの旅客の移動コストは以下のように定義した。

- 乗継客：移動の所要時間
- 接続先車両に乗車済の旅客：出発時刻調整によって生じた待ち時間

また、旅客が被った不利益によって与えるポイントは以下のように定義した。

- 乗継客：バス遅延が生じなかった場合に想定される移動所要時間と比較して移動時間が増加した場合、累計ポイントに 2 ポイント加算
- 接続先車両に乗車済の旅客：出発時刻調整により待ち時間が生じた場合、累計ポイントに 1 ポイント加算

図 5 (i) は b1372、r117、r143 の各車両の乗車人数を表 1 (i) に示したように設定した予測 OD を用いて最適ダイヤ変更オプション探索を 100 回試行した結果である。

このケースではほとんどの回において「r117 を出発時刻調整」というダイヤ変更オプションが選択されている。r143 と比較して r117 の方が乗車済の旅客の待ち時間増分が少なく、かつ駅 2 への到着時刻が早いので、「r117 を出発時刻調整」というダイヤ変更オプションが他の選択肢と比較して大幅に移動コストが小さくなり、このような結果になったと考えられる。

図 5 (ii) は b1372、r117、r143 の各車両の乗車人数を表 1 (ii) に示したように設定した予測 OD を用いて最適ダイヤ変更オプション探索を 100 回試行した結果である。このケ

¹ "Trasporti pubblici del Trentino (formato GTFS)" ©Provincia Autonoma di Trento, 2019 (Licensed under CC BY 4.0)
[<https://dati.trentino.it/dataset/trasporti-pubblici-del-trentino-formato-gtfs>]

ースでは「r117 を出発時刻調整」というダイヤ変更オプションと「出発時刻調整しない」というダイヤ変更オプションが交互に選択されている。

(ii)では r117 を延発させる必要がある分数は少ないが、乗継客の人数も少ない。接続確保されなかった場合の乗継客の待ち時間増分と、r117 を出発時刻調整した場合に r117 に乗車済の旅客に生じる待ち時間増分が拮抗していたため、各旅客のポイント累計値の分散を考慮した影響を受けて解が変化したと考えられる。

図5 (iii) は b1372、r117、r143 の各車両の乗車人数を表1 (iii) に示したように設定した予測 OD を用いて最適ダイヤ変更オプション探索を 100 回試行した結果である。このケースでは「r117 を出発時刻調整」というダイヤ変更オプションと「r143 が出発時刻調整」というダイヤ変更オプションが交互に選択されている。

(iii)においては r117 は接続確保するために車両を遅らせる分数が少ないが r143 と比較して乗車済の旅客の人数が多い。一方で r143 は車両を遅らせる分数は多いが乗車済の旅客の人数は少ない。したがって r117 を接続確保させた場合の移動コストと r143 を接続確保させた場合の移動コストが拮抗し、各旅客のポイント累計値の分散を考慮した影響を受けて解が変化したと考えられる。

(i)~(iii)の実験結果から、提案方式によって旅客の移動コストとポイントの分散に応じた最適ダイヤ変更オプションを選択できると言える。

5. おわりに

本稿では、バス遅延に呼応した鉄道の出発時刻調整をユースケースとして、旅客間の不平等を平準化しつつ移動コスト総和を低減するオペレーション最適化方式を提案した。提案方式の有効性を検証するため、とある地域の公共交通機関の駅発着時刻オープンデータを用いて評価を行った。実験結果から、提案方式によって乗継客および接続先車両に乗車済の旅客の移動コスト総和を考慮しつつ、特定の路線の利用者のみが不利益を被らないようにオペレーションを導出できることを示した。

今後の課題としては、旅客が移動時間の増加に不満を感じはじめる意識限界、待ち時間の多寡、曜日・時間帯などを用いた不利益のモデル化が挙げられる。これにより、より旅客需要の実態に即したポイント付与の実現が期待される。また、本稿で提案した交通システムアーキテクチャを用いて、省エネルギーなオペレーションに協力した旅客にインセンティブを与えることで「旅客に多少の負担がかかるが環境にやさしいオペレーション」を行い、環境負荷を低減できる可能性がある。本稿で提案した交通システムおよびオペレーション最適化方式を用いた MaaS ソリューションの更なる検討も重要な課題である。

参考文献

- [1] 宇都宮 浄人, “MaaSの時代に求められること”, JREA, Vol.63, No.2, pp.7-10, (2020).
- [2] 田中 健裕, 高松 瑞代, 菅原 宏明, 山口 東, “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”, 都市計画論文集, Vol.52, No.3, pp.1320-1326, (2017).
- [3] 東日本旅客鉄道株式会社, 小田急電鉄株式会社, “~JR 東日本と小田急電鉄は、シームレスに移動できる社会の実現に向けて連携します~”, (2019).

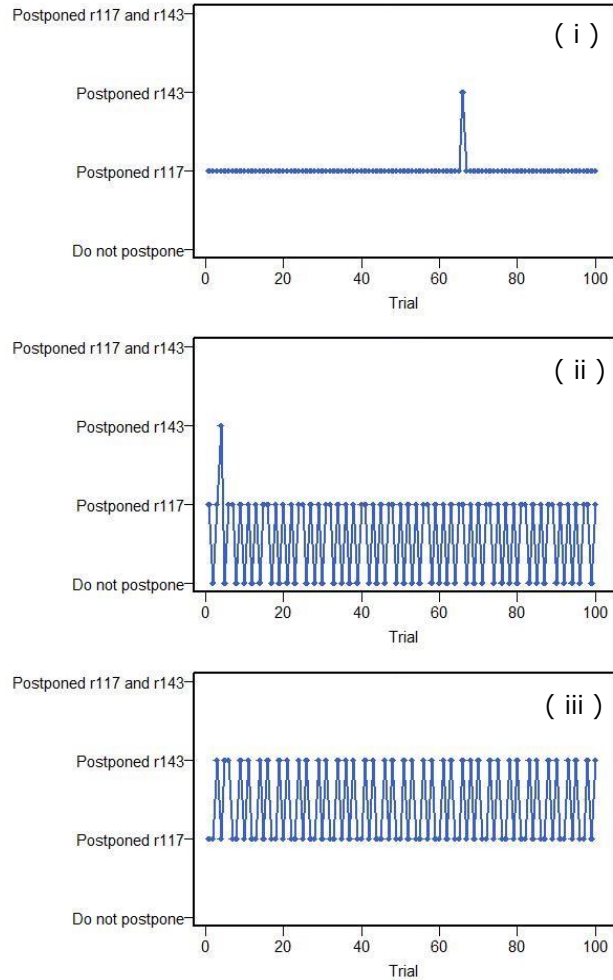


図5 実験結果

[<https://www.jreast.co.jp/press/2018/20190115.pdf>] (参照 2021-04-02).

- [4] 運輸政策研究機構, “鉄道整備等基礎調査「鉄道駅における他交通モードとの連携方策に関する調査」”, 運輸政策研究, Vol.10, No.1, pp.90-93, (2007)
- [5] 原田 真吾, 富井 規雄, “鉄道ネットワーク全体を考慮した最適接続判断アルゴリズム”, 電気学会研究会資料. TER, 交通・電気鉄道研究会, No.32, pp.53-57, (2009).
- [6] 金井 里司, 富井 規雄, “鉄道ネットワーク全体を考慮した最適接続決定アルゴリズムとその評価”, 第16回鉄道技術連合シンポジウム J-RAIL2009, pp.163-166, (2009).
- [7] 西内 裕昌, 轟 朝幸, “交通マーケティング手法検討のためのICカードデータを活用した利用者行動特性の把握”, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.68, No.2, (2012).
- [8] 加藤 浩徳, 家田 仁, 小野田 恵一, “MNLに基づく出発時刻選択行動モデルを用いた通勤鉄道利用者の列車待ち時間に対する意識限界に関する実証的分析”, 土木計画学研究・論文集, No.20, pp.523-530, (2003).
- [9] 高田 和幸, 鈴木 孝典, 藤生 慎, “鉄道の遅延時間を考慮した出発時刻決定行動に関するモデル分析”, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.68, No.5, pp.I_1071-I1077, (2012).
- [10] Tomoichi Ebata, Tatsuhiko Sato, Yoshiyasu Takahashi, Yumiko Ishido, Minoru Koizumi, “Symbiotic Autonomous Decentralized System on Cooperative Distributed Scheduling”, Proceedings of 6th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI), (2017).