

電車との乗り換えに着目したバス時刻表最適化に関する研究

熊本大学 学生会員 ○宮本 萌乃
 熊本大学 正会員 柿本 竜治
 熊本大学 正会員 安藤 宏恵

1. はじめに

近年わが国の多くの地方都市では、人口減少による過疎化と高齢化から、日常生活に必要な公共交通サービスの維持が困難になりかねない状況にある。持続可能な都市のためには、複数の地域拠点に都市機能を集中し、それらを利便性の高い公共交通で結ぶことが必要である。しかしながら新たな公共交通手段の導入は要する時間や費用が大きい。そのため、既存の異なる公共交通機関の連携を高めることによって、大きな投資をすることなく利便性の向上が見込めると考える。本研究では輸送量の多い鉄道と柔軟性の高いバスの乗り換えに着目し、バスのダイヤの最適化を考える。本研究における最適化¹⁾とは利用者の乗換を円滑にすることを目的とし、バスの本数や運行順序は可能な限り現状の時刻表を維持することを指す。

2. 研究方法

2.1 時空間ネットワーク

本研究で利用する時空間ネットワーク設計²⁾に関する説明を図-1に示す。時空間ネットワークのノードは、バス停や駅におけるバスや電車の到着を意味する着ノードと、出発を意味する発ノードからなる。リンクは以下のように定義される。

- ・走行リンク: 停留所間のバスや電車の移動
- ・着発間リンク: 停留所におけるバスや電車の一時的な停車
- ・乗換リンク: 乗り換え可能地点での利用者の乗換

走行リンクは停留所間のバスや電車の走行を表現するリンクであり、発ノードを始点、着ノードを終点とする。着発間リンクはバスや電車の停車を表現し、同じバス停における着ノードを始点、発ノードを終点とする。ただし今回は電車の停車時間をなしと考えると着発間リンクは0に定義する。乗換リンクはバスや電車の乗り換えを表すリンクであり、異なるバスや電車の着ノードを始点、発ノードを終点とする。各ノードは時刻表に対応する時刻を持つ。走行リン

ク、着発間リンク、乗換リンクの長さは端点となるノードの時間差により定める。

本研究では定刻通りに運行可能な電車の時刻を所

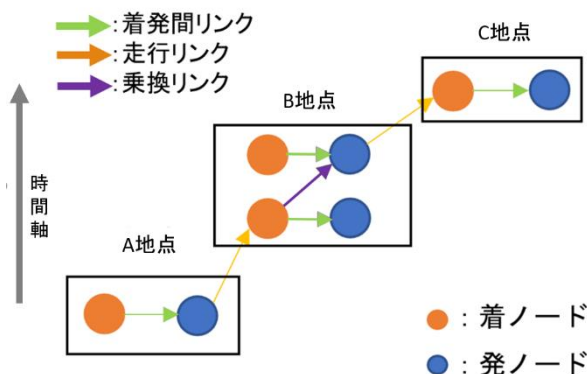


図-1 時空間ネットワーク

与として、バスの時刻のみを変数とした問題を構築する。そして乗換リンクと着発間リンクの長さをより短くすることで、乗換の円滑化を実現する時刻表の改良を目指す。

2.2 時刻表設計の数理計画モデル

本研究では、各バス停において任意の乗り換え待ち時間を超える場合に、超過した時間の総和を最小化する違反最小化モデル²⁾を利用する。乗換超過時間最小化モデルは以下の通りである。

$$\min. \sum_{(l,m) \in L} \sum_{(i,j) \in P_{lm}} u_{ij} \quad (1)$$

$$-M \sum_{(l,m) \in L} \sum_{(i,j) \in P_{lm}} z_{ij}$$

$$s. t. \sum_{j: (i,j) \in P_{lm}} z_{ij} \leq 1, \forall (l,m) \in L, \forall i \in Q_1 \quad (2)$$

$$M(z_{ij} - 1) + 3 \leq t_j - t_i \leq r_{lm} + u_{ij} - M(z_{ij} - 1) \quad (3)$$

$$\forall (l,m) \in L, \forall (i,j) \in P_{lm}$$

ただし i, j は時空間ネットワークのリンク、 m, l は路線、 L は路線のペアの集合、 P_{lm} はバス同士（電車とバス）のペアの集合、 u_{ij} は許容できる待ち時間を超過した時間とする。 z_{ij} は路線 l から路線 m への乗り換えを考えると、多くのペア (i, j) の中

で最も円滑な乗り換えの候補となるものを 1 とし、それ以外を 0 とする 0-1 変数である。また Q_1 は路線 l のバス（電車）の集合、 r_{lm} は許容できる乗り換え待ち時間とする。(2)は各 $i \in Q_1$ について乗り換え先 j は 1 つあればいい制約を表し、(3)は乗り換え時間 $t_j - t_i$ が 3 分以上であることを表している。

3. 試算結果

3.1 簡易ネットワーク

試算対象として電車とバス間の乗換地点を B とした簡易ネットワークを定義し、図-2 に示す。ここで A-C 路線は鉄道路線、D-E 路線はバス路線とする。また設定した時刻表は表 1、2 のようになる。それぞれ次の停留所までの移動にかかる時間は 10 分と設定し

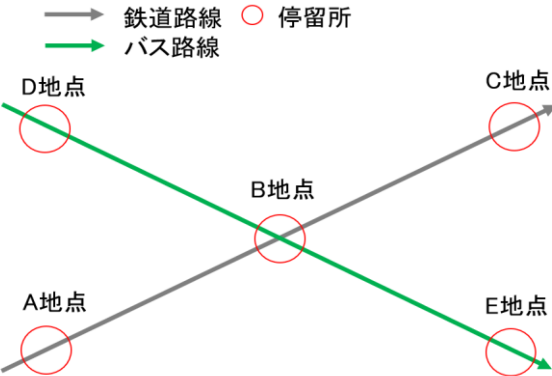


図-2 簡易ネットワーク

ている。

表 1 電車の時刻表

A	B	C
9:00	9:10	9:20
10:30	10:40	10:50
12:00	12:10	12:20
14:20	14:30	14:40
16:45	16:55	17:05

表 2 バスの時刻表

D	B	E
9:10	9:20	9:30
10:00	10:10	10:20
12:10	12:20	12:30
13:00	13:10	13:20
13:45	13:55	14:05
15:00	15:10	15:20
16:00	16:10	16:20
16:30	16:40	16:50
16:55	17:05	17:15
17:15	17:25	17:35

3.2 試算結果

次に改変後の時刻表を表 3 に示す。既存の時刻表をもとに、電車からバスの乗換、バスから電車の乗換について電車のダイヤを軸として考える。最も円滑な乗り換えの候補を $z_{ij} = 1$ とし、バスの時刻を変数として最適化を行った。ここでの制約条件としてバスの出発時刻と到着時刻の差が 5 分以内であること、出発時刻が到着時刻よりも遅い時間にあること、また許容乗換時間を 15 分と設定した。許容乗換時間を違反しない組み合わせの乗換は現状のダイヤを維持し、違反したもののみ最小化を行った。

時刻表の比較から、電車とバスの相互の乗換ともに 15 分以内に抑えられる組み合わせを作ることができた。

表 3 改変後のバスの時刻表

D		B		E	
出発	到着	出発	到着	出発	到着
9:10	9:20	9:20		9:20	9:30
10:25	10:35	10:40		10:40	10:50
12:10	12:20	12:20		12:20	12:30
13:00	13:10	13:10		13:10	13:20
13:45	13:55	13:55		14:05	14:05
14:15	14:25	14:30		14:40	14:40
16:00	16:10	16:10		16:20	16:20
16:30	16:40	16:40		16:50	16:50
16:55	17:05	17:05		17:15	17:15
17:15	17:25	17:25		17:35	17:35

4. おわりに

本研究では違反最小化モデルを用いてバスの時刻表の最適化を試み、その結果から乗り継ぎ利便性の向上を確認した。このモデルの導入によるバスダイヤの最適化によって、特に公共交通機関の運行本数の少ない地域で交通利便性の向上が見込めると考えられる。

今後は、実際の都市路線の時刻表を利用して最適化に取り組むこと、また実際のバス路線で発生する遅延についても再現し、より現実的な時刻表の最適化を行うことを目標とする。

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: 経営の科学, 2015, 60.9: 4-8.
- 2) 田中健裕, 高松瑞代, 菅原宏明, & 田口東. (2017). 交通状況による遅延を考慮し円滑な乗換を保証するバス時刻表の設計 静岡県富士市の公共交通設計への最適化技術の活用. 都市計画論文集, 52(3), 1320-1326.