

大阪・関西万博 2025 のシャトルバス交通シミュレーション

NTT コミュニケーション科学基礎研究所	*清水 仁	Hitoshi Shimizu
NTT コミュニケーション科学基礎研究所	藤野 昭典	Akinori Fujino
NTT コミュニケーション科学基礎研究所	澤田 宏	Hiroshi Sawada
NTT コミュニケーション科学基礎研究所	上田 修功	Naonori Ueda

1. はじめに

大規模イベントの来場者輸送では、鉄道による交通が大きな役割を果たす。しかし新型コロナの流行によってオリンピックが無観客で開催されるなど、来場者輸送の需要予測は困難な時代になっている。そこで本研究では、道路網を活用して鉄道より初期投資を小さくできるシャトルバスについて検討する。バスの運行計画は、路線網を設定した後に、時間帯ごとに運行頻度を決定する、という二段階の手順で作成することが一般的である [1]。しかしこの二段階による方法では、(1) 乗客数やバス定員を時々刻々適応的に考慮することができないことと、(2) 乗客の待ち時間の考慮が困難であることと、(3) 全時間帯にまたがる変数の導入が困難であること、の三つの課題がある。本稿ではこれらの課題に対して、新たな整数線形計画問題としての定式化を提案する。提案手法では待ち行列の人数の保存則を制約に加えることで、待ち時間を考慮した目的関数、および、全時間帯にまたがる変数を導入可能とする。また、大阪・関西万博 2025 からの帰宅を想定した設定に提案手法を適用し、乗客数によって路線網とコストが変化様子、シミュレーション結果として示す。

2. 提案手法

以下のコストの和が最小の運行計画を作成する。

乗車コスト (RC: Ride Cost) 乗客が路線 l にバス停 m まで乗車するとき、乗客数 b_{tl}^m と乗車時間 τ_{ℓ}^m に比例して発生するコスト $r\tau_{\ell}^m b_{tl}^m$ 。

運行コスト (PC: Path Cost) バスが路線 l で運行するとき、バス台数 v_{tl} と運行時間 τ_{ℓ} に比例して発生するコスト $r'\tau_{\ell} v_{tl}$ 。

車両コスト (VC: Vehicle Cost) バスの保有台数 U に比例して発生するコスト gU 。

待ち時間コスト (WC: Wait Cost) 乗客の待ち時間、すなわち待ち行列の人数 w_t^m と時間 Δ

表 1: 記号の定義

N	来場者数	
t	時刻を表す変数. $0 \leq t \leq T$	
m	バス停を表す変数. $m \in M$	
l	路線を表す変数. $l \in \mathcal{L}$	
τ_{ℓ}^m	始点~バス停 m の路線 l に沿った移動時間	
τ_{ℓ}	路線 l の運行にかかるバスの移動時間	
D_{ℓ}	路線 l の運行にかかる時間帯数	
x_t^m	時間帯 t に発生する始点から m までの需要	
a_{ℓ}^m	路線 l 中のバス停 m の有無を示す指示変数	
最適化対象の変数		
v_{tl}	時間帯 t に路線 l として運行するバス台数	
w_t^m	バス停 m へのバスを待つ時刻 t の行列人数	
b_{tl}^m	時間帯 t での路線 l のバス停 m への乗客数	
u_t	時間帯 t に運行中のバス台数	
U	バス会社が保有しているバス台数	
y_{ℓ}	路線 l の運行の有無を示す指示変数	
パラメータ設定		
C	バスの定員	50 人/台
Δ	時刻 t から $t+1$ の時間幅	5 分
T	時間帯の数	100 (50 分)
E	バス停の停車可能台数上限	4 台/5 分
g	バス 1 台を保有するコスト	100,000 円/台
r	乗車コストの比例定数	40 円/人・分
r'	バス運行コストの比例定数	100 円/台・分
s	待ち時間コストの比例定数	100 円/人・分
s'	帰宅不能コストの比例定数	20,000 円/人

に比例して発生するコスト $s\Delta w_t^m$ 。

帰宅不能コスト (OC: Overflow Cost) 時刻 T までに帰宅できない来場者数 $w_{t=T}^m$ に比例して発生するコスト $s'w_{t=T}^m$ 。

ただし運行計画は以下の制約条件を満たす。

$$w_{(t+1)}^m - w_t^m = x_t^m - \sum_{\ell|m \in \ell} b_{t\ell}^m \quad \text{待ち行列} \quad (1)$$

$$\sum_{m \in \ell} b_{t\ell}^m \leq C v_{t\ell} \quad \text{バス定員} \quad (2)$$

$$\sum_{\ell \in \mathcal{L}} \sum_{d=-D_{\ell}}^0 v_{(t-d)\ell} \leq u_t \quad \text{運行中バス台数} \quad (3)$$

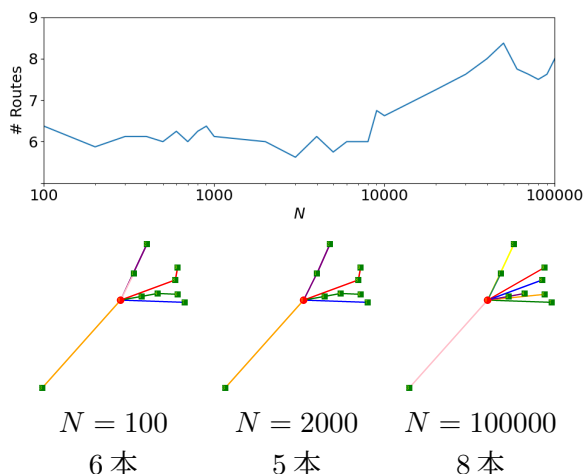


図 1: (上) 選択された路線網に含まれる路線の数. (下) 路線網の例. 同色の線で 1 本の路線を示す.

$$u_t \leq U \quad \text{保有バス台数} \quad (4)$$

$$v_{tl} \leq E y_l \quad \text{バス停容量} \quad (5)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} a_l^m y_l = 1 \quad \text{路線選択} \quad (6)$$

この中で、式 (1) は待ち行列の人数の保存則を表す制約であり、新たに行列に並ぶ人数と乗車する人数の差分だけ待ち行列の人数が増減するために成立する。また、保有バス台数 U と路線運行の指示変数 y_l は全時間帯にまたがる変数である。

3. シミュレーション実験

大阪関西万博 2025 のマスタープラン (<https://www.expo2025.or.jp/overview/masterplan/>) で万博会場へのシャトルバスの発着が想定される 9 か所の駅をバス停とし、復路のみを検討対象とする。全バス停の順列からなる路線を全て選択可能にすると計算量が過大となるため、各バス停までの乗車時間が直行にかかる時間の 1.1 倍以内となる 25 本の路線を候補とする。実験では、定式化の中のパラメータを表 1 に示す値に設定した。需要 x_t^m は駅の利用者数の割合を参考に、 $t = 50$ でピークを持つように乱数で生成した。Python と Gurobi で実装し、CPU は Intel(R) Core(TM) i7-1185G7 3.00GHz、メモリは 32GB の計算機で、制限時間を 900 秒に設定して解を求めた。

提案手法によって選択された路線網の例を図 1(下) に示す。 $1000 \leq N \leq 10000$ の範囲では複数のバス停を巡回する路線が採用されて路線数が

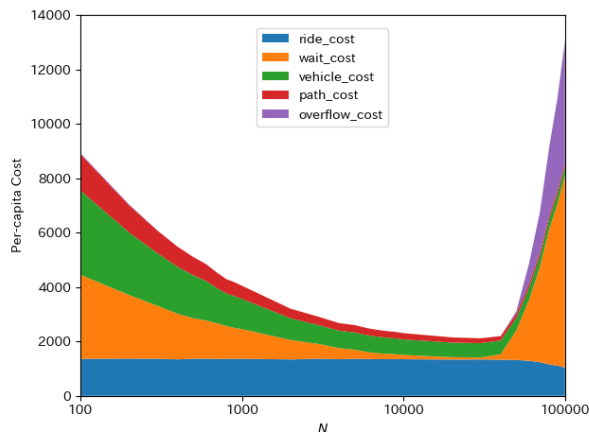


図 2: 乗客一人当たりのコスト. 横軸は来場者数 (単位: 人, 対数軸). 縦軸の単位は円.

小さくなるが、乗客が多いとき ($10000 \leq N$) は輸送能力を大きくできる直行便が採用されやすいため路線数が大きくなる。(図 1(上)).

乗客一人当たりのコストを図 2 に示す。乗客が増加すると便数は増えるが、空席が減って効率がよくなり待ち時間も減少するため、一人当たりのコストは低下する。複数のバス停を巡る路線が増えるが、乗車時間の増加はわずかである。しかし、 $N > 50000$ でバス停の停車可能台数の上限に達すると増便できず、待ち時間と帰宅不能な人数が増加し一人当たりのコストは急上昇する。

以上の実験により、提案手法を用いて来場者数に適応した運行計画が作成可能であることを示した。来場者数によっては直行便以外の路線が有効となる場合があることは、重要な知見と考える。現実の計画では鉄道網も利用も想定しているが、併用した場合の分析 [2] は今後の課題である。

参考文献

- [1] Ibarra-Rojas, O. J., Delgado, F., Giesen, R. and Muñoz, J. C.: Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 77 (2015), 38–75.
- [2] 田中健一, 鳥海重喜, 田口東: 東京ベイゾーンへのオリンピック観戦客の輸送を想定した直通バスの数理モデル, 都市計画論文集, Vol. 52 (2017), 696–703.