

SUMO を用いたデマンド交通における配車アルゴリズムの シミュレーション評価

楊 美琪[†] 神山 剛[‡]

[†]長崎大学 総合生産科学研究科 〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14

[‡]長崎大学 情報データ科学部 〒850-0046 長崎県長崎市幸町 7-1

E-mail: [†] bb54124657@ms.nagasaki-u.ac.jp, [‡] kami@nagasaki-u.ac.jp

あらまし 長崎県東彼杵町等の地方自治体では、公共交通の維持に向けデマンド交通（DRT）の導入が進んでいる。しかし、既存の商用システムは即時性を重視した汎用的な配車ロジックを採用しており、地域固有の需要特性に対して必ずしも最適化されていない。本研究では、同町における約1年間の実運行データ（1,131件）を分析し、需要が特定の主要拠点に集中する「ハブ・アンド・スポーク型」構造を明らかにした。この特性を踏まえ、ハブ関連の予約に対して意図的な待機時間を設け、同一方向への乗り合わせを促進する「拠点集約型配車ロジック」を提案する。交通流シミュレータ SUMO を用いた比較実験により、運営方針の優先度に応じて最適な配車手法が異なること、特に配車不能を許容しない運用要件においては提案手法が優位であることを定量的に確認した。

キーワード デマンド交通, マルチエージェントシミュレーション, 配車アルゴリズム, 地理情報, MaaS

1. はじめに

近年、人口減少や高齢化が進む地方自治体において、持続可能な移動手段としてデマンド交通（DRT）の導入が進んでいる[1]。長崎県東彼杵町においても、自治体が導入している商用デマンド交通システムを活用した DRT が運行されている。しかし、既存の商用システムは汎用的な配車ロジックを採用している場合が多く、必ずしも個々の地域の需要パターンやネットワーク特性に最適化されているとは限らない。

特に東彼杵町の実データを分析すると、移動需要は均一に分散しているのではなく、特定の拠点（駅・商業施設・病院等）と各集落を結ぶ放射状の移動（ハブ・アンド・スポーク型）に極端に集中していることが判明した。このような需要構造において、単に発生順に処理する先着順のロジックでは、同一方面への需要をバラバラに輸送することになり、限られた車両数（2台）では非効率な走行が増大する恐れがある。

そこで本研究では、SUMO を用いて東彼杵町の交通環境および実運行データを再現したシミュレーションモデルを構築する。その上で、即時性を重視した「標準的な配車方針（方針 A）」と、拠点への集約を重視した「提案方針（方針 B）」を比較し、運営が重視する目標に応じてどちらの手法が適切かを明らかにする。

2. 関連研究

2.1. DRT における配車アルゴリズム

DRT 配車問題（Dial-a-Ride Problem: DARP）に関する研究は古くから行われており、その手法は「動的ケース」と

「静的ケース」に大別される。動的ケースは、リクエスト発生時に即座に最適な車両へ割り当てる手法であり、計算負荷が低く即時性に優れるため多くの実用システムで採用されている [2]。国内においても、中島ら [3] による SAVS がリアルタイムな全体最適化を実現し、その有効性が示されている。一方、静的ケースは一定時間のリクエストを蓄積し全体最適化を図る手法であるが、利用者の待ち時間が増加する傾向にある。既存の多くの研究 [4] は都市部のような高密度な需要を前提としており、過疎地特有の低密度かつ長距離移動を伴う環境下での配車効率については議論の余地が残されている。

2.2. 地域特性とハブ・アンド・スポーク型モデル

地方部における交通需要は駅や病院、商業施設などの「特定拠点（ハブ）」に集中する傾向がある。こうした地域では、ハブと各集落を結ぶ「ハブ・アンド・スポーク型」のネットワークが効率的であることが知られている [5]。しかし、既存の汎用的な DRT 配車システムは、こうした「特定方向への需要集中」を明示的にアルゴリズムに組み込んでいるケースは少ない。

2.3. SUMO を用いた交通シミュレーション

交通流シミュレータ SUMO（Simulation of Urban Mobility）は、微視的な交通挙動の再現に優れており、DRT の導入効果測定にも広く用いられている [6] [7]。

2.4. 本研究の位置づけ

以上を踏まえ、本研究は以下の点において独自性を有する。(1) 汎用的な動的ケース（方針 A）に対し、

地域のハブ構造を利用して意図的に割当を遅延させる「拠点集約型（方針 B）」を提案する点。（2）仮想データではなく、東彼杵町の実運行データに基づき、需要増加シナリオにおけるシステムの堅牢性を SUMO で定量的に評価する点。（3）単一指標による優劣判定ではなく、運営方針の優先度に応じた配車手法の選択指針を提示する点である。

3. 提案手法

本章では、過去の注文履歴（1,131 件）の分析結果に基づき、提案手法の設計根拠を述べる。全リクエストの乗降地点を集計したところ、利用頻度上位 10 地点（Fig. 1）の延べ乗降回数は全体の約 69%を占めることが判明した。さらに、全リクエストの約 87%がこれら上位 10 地点を起点または終点に含んでおり、需要が特定拠点に極めて高い集中度を示すことが確認された。この分析結果に基づき、上位 10 地点を主要ハブ拠点（Main Hubs）と定義する。

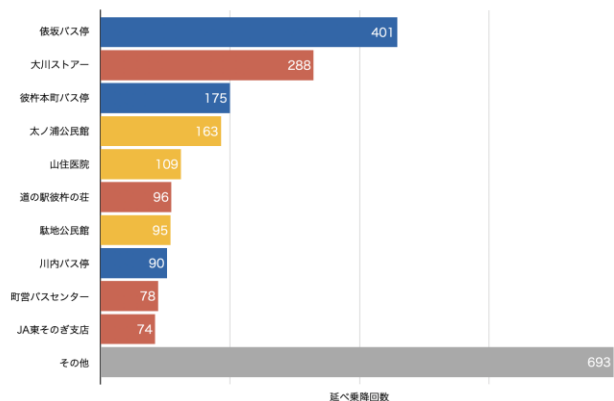


Fig. 1: 停留所別の延べ乗降回数（上位 10 地点）

3.1. 配車計画問題の定式化

$$J = \sum_{i \in R} (\alpha \cdot T_i^{\text{wait}} + \beta \cdot T_i^{\text{ride}}) + \gamma \sum_{k \in V} D_k$$

Alonso-Mora ら [8] が示すように、リクエストを一定時間蓄積し大域的な最適化を図る手法は、高密度な需要に対して高い輸送効率を実現する。本研究ではこの知見を過疎地の拠点集約モデルに応用し、配車計画を上記の目的関数 J を最小化する最適化問題として定式化する。リクエスト集合を R 、車両集合を V とし、各リクエスト i の待ち時間を T_{wait} 、乗車時間を T_{ride} 、車両 k の総走行距離を D_k と定義する。重み係数 α, β, γ はそれぞれ待ち時間・乗車時間・走行距離の優先度を表し、例えば $\alpha = 1, \beta = 0, \gamma = 0$ は待ち時間最小化を最優先する「即時性重視」の運営を意味する。加えて、配車成功率 100% を制約条件とする「堅牢性重視」の観点からも評価を行う。

3.2. 具体的な処理プロセス

提案手法（方針 B）は以下の手順で実行される。① 空間的フィルタリング：新規リクエスト発生時、その起終点が主要ハブに含まれるかを判定する。含まれない場合は即時配車プロセス（方針 A と同様）へ移行する。② バッファリング：ハブ関連リクエストと判定された場合、即座に車両へ割り当てず、待機リストに一時保管する。同時に待機タイマー（300 秒）を作動させる。③ 二段階マッチング探索：待機リスト内を每秒走査し、同一方向の需要が 2 件以上検出された場合に即時配車を確定する。条件未達の場合、タイムアウト時に単独で配車を確定する。

4. シミュレーション

4.1. 環境構築

交通流シミュレータ SUMO を用い、東彼杵町の交通環境を再現した。道路ネットワークには OpenStreetMap (OSM) を使用し、実際の山間部の道路形状や集落の配置を反映させている。車両モデルは、実際に現地で運行されているワゴン車の性能（定員 8 名、最高速度 50km/h）に準拠したパラメータを設定した。停留所は 126 箇所を配置し、そのうち主要ハブ 10 地点は Fig. 1 に示す利用頻度上位の拠点である。

4.2. 入力データ

シミュレーションの需要データとして、同町で実際に運行された 2024 年 3 月 1 日から 2025 年 4 月 17 日までの約 13 ヶ月間の予約記録（計 1,131 件）を使用した。代表的な 5 日間の実績データを選定し、各日のリクエストを実際の発生時刻、乗車地点、降車地点、人数に基づき SUMO 上で再現した。

5. 評価実験

5.1. 比較手法の設定

方針 A（即時配車型）：新規リクエスト発生時に即座に最適な車両を選択し配車する。車両に既存の乗客がいる場合は、経路への挿入（insert 方式）により乗り合わせを自然に発生させる。標準的な FCFS (First Come, First Served) ロジックに基づく。

方針 B（拠点集約型）：3.2 節で述べたアルゴリズムに基づき、ハブ関連予約に対してバッファ時間（300 秒）を設け、同一方向の乗り合わせを積極的に探索する。Phase 1（同方向 2 件以上で即時配車）と Phase 2（タイムアウト時の単独配車）の二段階制御を行う。

5.2. 実験シナリオと評価指標

実データ（需要×1）に加え、将来的な利用促進を見据え、ポアソン分布を用いて需要密度を「×2」「×5」「×10」に拡大したストレスシナリオを作成した。各シナリオは代表 5 日間の実績データを基にそれぞれ生成し、計 40 実験（5 日間×4 倍率×2 方針）を実施し

た．評価指標は，平均待ち時間，平均乗車時間，総走行距離，配車成功率の4指標を用いた．これらの指標は，Papanikolaou ら[9]による DRT 評価フレームワークに基づき選定したものである．

5.3. 実験結果

Table 1 に全実験結果の平均値と標準偏差を，Fig. 2～5 に各指標の比較グラフを示す．なお，Fig. 4（平均乗車時間）における需要×1の標準偏差は，1日あたりのリクエスト数が10～16件と僅少であることに起因して平均値を上回っており，統計的な安定性が十分ではないため，参考値に留める．

Table 1: 需要倍率別の実験結果（5日間平均±標準偏差）

倍率	方針	待ち時間 (分)	乗車時間 (分)	総距離 (km)	成功率 (%)
×1	A	4.35±0.39	3.97±4.86	91.17±25.98	100.0
	B	6.16±1.22	3.80±4.66	93.38±24.62	100.0
×2	A	4.26±0.66	7.00±3.55	202.31±56.19	98.5±3.08
	B	6.16±0.96	7.02±3.65	197.66±53.64	100.0
×5	A	3.80±0.38	7.91±1.70	328.44±69.69	100.0
	B	5.65±0.99	10.09±0.92	338.77±69.04	100.0
×10	A	4.04±0.47	9.68±0.47	393.94±91.16	99.8±0.4
	B	5.19±0.69	9.02±0.93	404.18±94.29	100.0

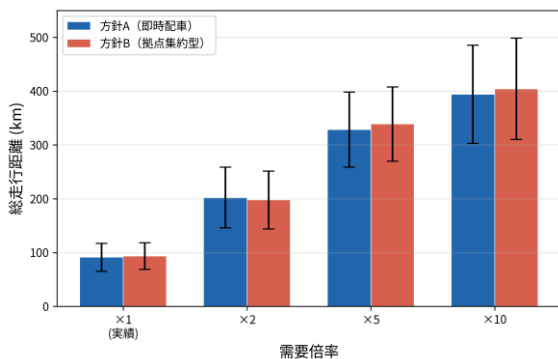


Fig. 2: 総走行距離の比較

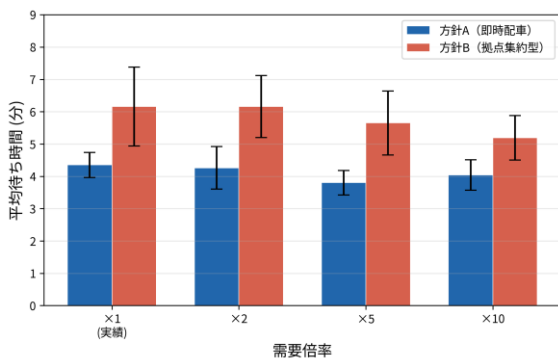


Fig. 3: 平均待ち時間の比較

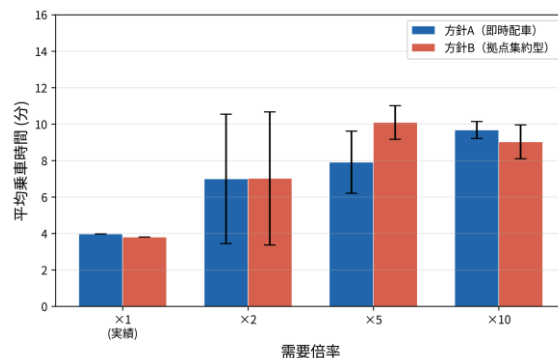


Fig. 4: 平均乗車時間の比較

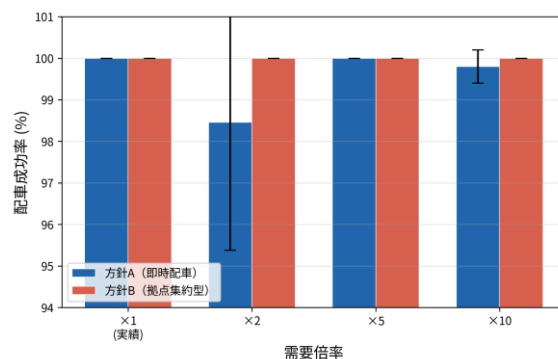


Fig. 5: 配車成功率の比較

6. 考察

6.1. 実験結果の概要

実験結果から以下の4つの傾向が確認された．

第一に，総走行距離については両方針間で大きな差は見られなかった．需要×2では方針Bが約5km短い結果となったが，×5および×10では方針Bが約10km長くなっており，両方針は距離効率においてほぼ同等であるといえる．方針Aにおいてもinsert方式で自然に乗り合わせが発生しており，需要×5で約40%，×10で約45%のリクエストが乗り合わせで処理されていた．

第二に，平均乗車時間については，低需要時（×1，×2）では両方針間でほぼ同等であった．高需要時には傾向が分かれ，×5では方針Bが約2.2分長く（10.09分 vs 7.91分），×10では方針Bが約0.7分短い（9.02分 vs 9.68分）結果となった．総じて，乗車時間に関しては一貫した優劣は認められなかった．

第三に，平均待ち時間については方針Bが方針Aより約1.2～1.9分長い結果となった．ただし，需要が増加するにつれてこの差は縮小する傾向が見られた（×1: 1.81分差→×10: 1.15分差）．これは高需要時にPhase 1の発動頻度が増加し，バッファ満了を待たずに配車が確定するケースが増えるためである．

第四に，配車成功率については明確な差が現れた．方針Bは全40実験において成功率100%を達成したのに対し，方針Aは需要×2で98.5%，需要×10で99.8%

と、需要増加時に配車不能が発生した。これは即時配車により車両が同時に遠方へ向かい、次のリクエストに対応できない状況が生じたことに起因する。

6.2. 運営方針別の評価

6.1 節の結果を踏まえ、目的関数の重み設定を変化させた場合の方針 A・B の優劣を Table 2 に整理した。

Table 2: 運営方針別の最適手法

運営方針	×1	×2	×5	×10	特記事項
即時性重視	A	A	A	A	全シナリオで A 優位
快適性重視	同等	同等	A	B	一貫した優劣なし
距離重視	A	B	A	A	×2 のみ B 優位
バランス型	A	同等	A	同等	×1,×5 で A 優位
堅牢性制約	A	B	A	B	A は×2,×10 で配車不能

即時性重視 ($\alpha = 1, \beta = 0, \gamma = 0$) の場合、全需要シナリオにおいて方針 A が優位であった。方針 A の平均待ち時間は 3.80~4.35 分であり、方針 B の 5.19~6.16 分と比較して約 1~2 分短い。

快適性重視 ($\alpha = 0, \beta = 1, \gamma = 0$) の場合、乗車時間に関しては一貫した優劣が認められなかった。バッファリングの有無だけでは乗車時間を体系的に改善できないことを示している。

堅牢性制約 (配車成功率 100% 必須) を課した場合、方針 A は需要×2 および×10 において配車不能が発生するため、方針 B が唯一の選択肢となる。実際の DRT 運営においては予約拒否はサービス信頼性を著しく損なうため、需要増加が見込まれる局面では方針 B が合理的な選択となる。

6.3. 地域特性に適した運用への示唆

以上の分析から、東彼杵町のような「拠点集中型」の需要を持つ地域においては、配車手法の選択は単一の指標では判断できず、運営が何を優先するかによって最適解が異なることが示された。また、方針 A においても insert 方式により高需要時に約 45% の乗り合わせが自然発生していた事実は、動的配車アルゴリズムの有効性を示す重要な知見であり、今後の配車アルゴリズム設計において考慮すべき点である。

7. まとめと今後の課題

本稿では、長崎県東彼杵町の実運行データに基づき、地域特性を考慮した DRT 配車ロジックの評価環境を SUMO 上に構築した。汎用的な即時割当ロジック (方針 A) に対し、ハブ拠点への集約を重視した提案手法 (方針 B) を定式化し、需要×1~×10 の 4 段階のストレスシナリオにおける比較評価を行った。

実験の結果、以下の知見が得られた。(1) 総走行距離および乗車時間については両方針間で同等であり、FCFS でも高需要時に insert 方式により約 40~45% の乗

り合わせが自然発生することが確認された。(2) 方針 B は全シナリオで配車成功率 100% を達成し、堅牢性において明確な優位性を示した。(3) 目的関数の重み設定に応じて最適な方針が異なり、特に配車不能を許容しない運用要件においては方針 B が合理的な選択となる。

今後の課題として、バッファ時間や最大待ち時間などのパラメータに関する感度分析、時間帯や需要密度に応じたパラメータの動的最適化、および車両台数を増加させた場合のスケラビリティ検証が挙げられる。これらを通じて、持続可能な地域交通の実現に向けた具体的な運用指針の確立を目指す。

参考文献

- [1] 竹内龍介, 吉田樹, 尾崎光政, “地方自治体によるデマンド交通及びコミュニティバスの導入効果の発現要因に関する研究”, 土木学会論文集 D3, Vol. 78, No. 5, pp. I_627--I_637, 2023.
- [2] J.-F. Cordeau and G. Laporte, “The dial-a-ride problem: models and algorithms,” *Ann. Oper. Res.*, Vol. 153, No. 1, pp. 29--46, 2007.
- [3] 中島秀之, 松原仁, 平田圭二, 白石陽, 佐野渉二, 金森亮, 小柴等, 野田五十樹, “Smart Access Vehicle System : フルデマンド型公共交通配車システムの実装と評価”, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 4, pp. 1290--1302, 2016.
- [4] M. Diana and M. M. Dessouky, “A new regret insertion heuristic for solving large-scale dial-a-ride problems with time windows,” *Transp. Res. Part B*, Vol. 38, No. 6, pp. 539--557, 2004.
- [5] M. Yajima, K. Sakamoto, and H. Kubota, “Efficacy of bus service reorganization utilizing a hub-and-spoke topology and DRT to meet community needs,” *IATSS Res.*, Vol. 37, No. 1, pp. 49--60, 2013.
- [6] D. Krajzewicz, “Traffic simulation with SUMO -- Simulation of Urban Mobility,” in *Fundamentals of Traffic Simulation*, Springer, 2010.
- [7] J. Bischoff, M. Maciejewski, and K. Nagel, “City-wide shared taxis: A simulation study in Berlin,” *Proc. of IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 275--280, 2017.
- [8] J. Alonso-Mora, S. Samaranayake, A. Wallar, E. Frazzoli, and D. Rus, “On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, Vol. 114, No. 3, pp. 462--467, 2017.
- [9] A. Papanikolaou, S. Basbas, G. Mintsis, and C.

Taxiltaris, "A methodological framework for assessing the success of Demand Responsive Transport (DRT) services," *Transportation Research Procedia*, Vol. 24, pp. 393--400, 2017.