

マルチモーダル交通シミュレータを用いた デマンドバス需要予測シミュレーション

伊志嶺 拓人^{†1} 赤嶺 有平^{†2} 遠藤 聡志^{†2}

地方都市では、自家用車が主要な交通手段となっており、それによる交通渋滞・環境汚染が深刻化している。そのため、公共交通機関の利用を促す必要があり、利便性の高い公共交通機関が求められている。そこで、デマンドバスが注目されているが、利用需要が不透明な部分もあり導入に至っている例は少ない。本研究では、リアルネットワークを使用したマルチモーダル交通シミュレータにより、自家用車、モノレール、徒歩など他の交通機関を含めたデマンドバス需要予測シミュレーションを行った。

Demand Forecasting of Demand Bus Using Multi Modal Traffic Simulator

TAKUTO ISHIMINE,^{†1} YUHEI AKAMINE^{†2}
and SATOSHI ENDO ^{†2}

In provincial city, people use private cars as the primary mode of transportation. it causes traffic congestion and environmental pollution. Therefore, to promote using the public transportation is needed. Although the demand bus attracts attention, there are little introduction examples because use demand is unknown. In this study, we simulated demand forecasting of demand bus using multi modal traffic simulator .

^{†1} 琉球大学大学院理工学研究科

Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus

^{†2} 琉球大学

University of the Ryukyus

1. はじめに

多くの地方都市では自家用車が主要な交通手段とされており、通勤退勤時の移動手段としても多く利用されている。そのため自動車台数が多く、特に都心部の交通渋滞、それによる環境汚染などが深刻な問題となっている。また、地方都市では人口密度が低く、交通需要が空間的に分散しているため、公共交通機関の収益性が悪く、それが公共交通の衰退を招いている。そのため、自家用車から公共交通機関へモーダルシフトを促す必要があり、より利便性の高い公共交通機関が求められる。

そこで、我々はデマンドバスに着目した。デマンドバスとは、特定の範囲内において、利用者の依頼に応じた乗降地点、乗降時間より選定した経路を運行する形態のバスである。デマンドバスは固定路線バスと違い、需要のある場合のみ運行するため、運行の効率化に繋がる。需要の変化にも柔軟な対応が可能である。また、希望する時間帯に利用でき、乗降地点を指定できることから、固定路線バスよりも利便性が向上することが期待でき、公共交通機関の利用者増加が期待できる。

しかし、デマンドバスの利用は実験に留まることが多く、実際に導入されている事例は少ない。その原因として、デマンドバス導入により、どの程度の利用需要が発生するか不透明な点が考えられる。本研究では、デマンドバスシステムの導入により、利用需要がどの程度発生するかをマルチモーダル交通シミュレータを用いてシミュレーションにより算出する。これにより、運営可能な利用需要が発生し、なおかつ採算が取れるデマンドバスの料金設定、経路決定アルゴリズムを模索する事が容易となり、有用性のあるデマンドバスシステムの導入を円滑に行う事が可能となることを期待する。

本稿は、以下のような構成となっている。2章では、デマンドバスに関する先行研究について述べる。3章では、本研究で用いる我々が開発した交通シミュレータについて説明し、シミュレータの性能評価を行う。4章では、デマンドバスの利用需要予測シミュレーションの結果を示し、5章では、シミュレーション結果の考察を行う。

2. 先行研究

これまでのデマンドバスに関する研究では、境らは、デマンドバスの運用面積に関する研究¹¹⁾を行っており、運用面積を小さくすることで、乗客の所要時間を改善できるとしている。原野らは、担当地域を割り当て、乗り継ぎを考慮したデマンドバス（協調型デマンドバス）の研究を行っており、乗車要求が少ない場合は、運行規模に関係なく、通常のデマンド

バスと比べ、協調型デマンドバスが時間効率がよく、乗車要求が多い場合は、通常のデマンドバスの方が時間効率が良いとしている。

野田らはデマンドバスの利便性評価に関する研究⁹⁾¹⁰⁾をしており、路線網を最適化した固定路線バスとデマンドバスの利便性の比較を行った。その結果、デマンド数とバス台数の比率を一定に保った場合、運行規模が拡大するほどデマンドバスの利便性は固定バスより改善が早く、十分な利用者がいて採算性が同じ場合、固定路線バスよりデマンドバスの方が利便性が良くなるとしている。また、利用者の分布が一極集中の場合デマンドバス、二極集中の場合固定路線バスが利便性が良くなるとしている。

内村らは、複数車両における Dial-a-Ride 問題に関する研究¹⁴⁾を行っており、遺伝的アルゴリズムを用いた複数車両を用いた場合における解の導入を行い、良好な計算時間・解が得られたとしている。同じく内村らは、リアルタイムに処理を行う Dial-a-Ride システムに関する研究¹³⁾をしており、渋滞状況を反映させ、リアルタイム処理することで、道路状況を反映させなかった場合に比べ、精度の良い解を生成することを示した。中谷らは、1台の車両に対する運行距離最小化問題に関する研究⁸⁾を行っており、動的計画法と A*アルゴリズムに基づいた厳密解放を提案している。林らは、デマンドバスの需要予測と運行形態の評価に関する研究⁵⁾を行っており、運行している自治体の高齢者数と地元説明会への参加者数により需要と普及率の予測を行っている。また、セミデマンドタイプとフルデマンドタイプの評価を行い、フルデマンドタイプの方が利用者側の利便性が高いとしている。

これまでの研究では、Dial-a-Ride 問題におけるスケジューアルゴリズムや、デマンドバスの利便性の評価に関するものが多い。リアルネットワークを使っているものは少なく、使っている場合でも OD データはランダムに生成したものであったり、渋滞情報は擬似的に生成したものである。また、需要予測を行っている研究は少なく、特に自家用車、バスや軌道交通など他の交通機関と比較して需要予測を行っている研究は筆者らが調べた限りない。そこで我々は沖縄県中南部の地図データを使ったリアルネットワーク上でパーソントリップデータを用い、自家用車・モノレール・徒歩での移動が可能な場合において、現状の固定路線バスを廃止し、デマンドバスを導入した場合に発生する需要の予測シミュレーションを行った。

3. 交通シミュレータ

本研究では、我々の研究室で開発したマルチモーダル交通シミュレータ「RMT³⁾」を用いている。

表 1 サービスレベル (LOS)
 Table 1 Level of Service

交通手段	LOS 設定方法
自家用車	<ul style="list-style-type: none"> ・主要な一般道および有料道路のネットワーク*1を利用 ・維持費、走行経費原単位を設定 ・旅行コストは、BPR 関数(式 1)より算出 ・二車線¹²⁾: $\alpha = 0.95, \beta = 1.3$, 多車線¹²⁾: $\alpha = 0.82, \beta = 1.3$ ・高速²⁾: $\alpha = 0.7, \beta = 2.3$
徒歩	<ul style="list-style-type: none"> ・ネットワーク構造は一般道路と同一 ・旅行コストは、最短距離を歩行速度で除した値 ・交通量の増加に対する旅行コストの増加はない
バス	<ul style="list-style-type: none"> ・バス速度=(制限速度+a)bより算出 ($\alpha = 10, \beta = 0.7$) ・運行頻度より待ち時間を設定 ・旅行コストは、BPR 関数(式 1)より算出 ($\alpha = 0.5, \beta = 4$)
軌道交通	<ul style="list-style-type: none"> ・乗車定員数と運行数の積により交通容量を算出 ・運行頻度より待ち時間を設定 ・旅行コストは、BPR 関数(式 1)より算出 ・モノレール: $\alpha = 0.5, \beta = 4$

RMT では、表 1 のように LOS を設定し、これを用いて各エッジのコストを算出し、ロジカルネットワーク(図 1)を生成する。ロジカルネットワークとは、我々が提案するネットワークであり、実道路ネットワークのエッジを交通手段によって分けたネットワークである。経路配分時にロジカルネットワークを利用することにより、交通手段選択を含めた最小旅行コストの経路選択が可能となっている。さらに、公共交通機関においては乗り継ぎを考慮した経路選択が可能であり、歩行により駅への移動も可能である。

シミュレーションの流れとしては、まず交通センサスなどの OD 情報(出発地、目的地情報)を入力する。次に、生成したロジカルネットワークを用いて、確定的利用者均衡配分法⁴⁾⁶⁾とダイクストラ法により、交通手段と移動経路を同時に算出し、Wardrop の第一原則に基づき、利用者はこれ以上経路・交通手段を変更しても、旅行コストを下げるできない状態となる。

旅行コストとは、各エッジにおいて移動時間・交通量・料金などにより算出される値であり、自家用車、軌道交通については、一般的なリンクパフォーマンス関数である BPR 関数(式 1)より算出する。交通容量は、道路構造令の設計基準交通量に基づき設定し、自由旅行速度は、実際の規制速度を基にエッジ毎に設定している。

*1 数値地図 25000 (空間データ基盤) を基に作成

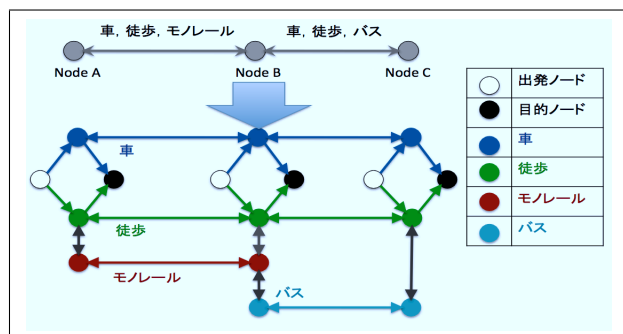


図 1 ロジカルネットワーク
Fig. 1 Logical network

$$t_i = t_{i0} \left(1 + \alpha \left(\frac{x_i}{C_i} \right)^\beta \right) + \frac{cost}{timevalue} \quad (1)$$

- t_i : リンク [i] の旅行時間
- t_{i0} : リンク [i] の自由旅行時間 (交通量 = 0)
- α, β : パラメータ
- C_i : 交通容量
- x_i : 交通量
- $cost$: 公共交通料金・燃料費など
- $timevalue$: 時間評価値

本研究では用いていないが、Nagel-Schreckenberg モデル⁷⁾ による自家用車、公共交通等のミクロシミュレーションが可能である。

3.1 シミュレータの仕様

本交通シミュレータに実装されている移動手段は「自家用車・バス・軌道系交通・徒歩」となっている。入力データは道路情報、地域情報、公共交通路線網である。道路情報は交差点 ID、位置情報、接続ノード数、リンク情報となっている。地域情報は就業者数、人口、面積などである。シミュレーションで使用した主なパラメータは表 2 のようになっている。

3.2 現況再現性評価 (自家用車)

シミュレータの評価として、沖縄県那覇市周辺の道路において自家用車のみ交通配分を行い、平成 17 年度道路交通センサス¹⁾ により調査された 12 時間 (7 時～19 時)、24 時間

表 2 パラメータ
Table 2 Parameter

パラメータ	値
時間評価値	24.25[円/分](H18 年沖縄県 PT 調査)
自家用車維持費	323[円/日] (H19 年 総務省家計調査)
自家用車走行経費原単位	16.65[円/km](H20 国土交通省)
モノレール料金	初乗り 200 円 (1km=7 円)
歩行速度	4[km/h](H18 年沖縄県 PT 調査)
那覇市内線バス料金	一律 200 円
市外線バス初乗り料金	140 円 (1km=30 円)
ノード数	583
リンク数	1863
ネットワーク範囲	東西 約 12km, 南北 約 35km

表 3 シミュレーション条件 (自家用車)
Table 3 Simulation conditions(private car)

場所	沖縄県那覇市周辺
OD データ	平成 18 年 沖縄県 PT 調査
総トリップ数	1475659
交通手段	自家用車

の交通量と本シミュレータにおいて算出された交通量との相関を調べた。OD データは平成 18 年度第 3 回沖縄本島中南部都市圏パーソントリップ調査報告書²⁾ (以下平成 18 年沖縄県 PT 調査) の一日の D ゾーン間全目的自家用車 OD を用いた。シミュレーション条件は表 3 である。12 時間の交通量との比較結果を図 2 に示す。サンプル数は 137 となっている。12 時間の交通量とのグラフの相関係数は 0.94。誤差率 25%以内の箇所は 76%となっており、自家用車のみ配分において相関のある結果が得られた。24 時間の交通量とのグラフの相関係数は 0.93、誤差率 25%以内の箇所は 55%となった。24 時間に比べ、12 時間の結果が誤差率の低い結果となった。

3.3 現況再現性評価 (公共交通)

公共交通機関を含めた交通配分を評価するため、沖縄県那覇市周辺において、自家用車・路線バス・モノレール (ゆいレール)・歩行での交通配分を行った。ゆいレールとは那覇市南東に位置する那覇空港と同市北西の首里を結ぶモノレールで、沖縄県唯一の軌道交通システムである。本シミュレーションでは、全目的、全手段における OD データを使用し、各ゾーンに属するノードへ均等に OD データを配分した。対象時間は一日である。シミュレー

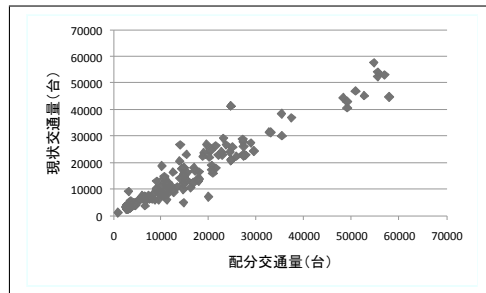


図 2 実データとの比較

Fig.2 Compare real data with simulation result

表 4 シミュレーション条件 (モノレール)
Table 4 Simulation conditions(monorail)

場所	沖縄県那覇市周辺
OD データ	平成 18 年 沖縄県 PT 調査
総トリップ数	2195994
交通手段	自家用車・バス・モノレール・徒歩

シミュレーション条件は表 4 の通りである。

各交通手段の利用者数算出結果を表 5 に示す。実データは平成 18 年沖縄県 PT 調査による数値である。各交通手段のにおいて実データに近い結果が得られた。次に、B ゾーン単位において、各ゾーン間の自家用車利用者数、徒歩、モノレール利用者数の算出を行い、実データとの相関を計った。実データは、平成 18 年沖縄県 PT 調査により調査された B ゾーン間における各交通手段の利用者数である。結果を表 6 に示す。

各交通手段に相関が見られ、交通手段選択において高い現況再現性があることを確認できた。

次に、一日あたりのモノレール利用者数の駅別モノレール利用者数の相関を計った。駅別モノレール利用者数を実データと比較したグラフを図 3 に示す。

各駅において実データと近い配分が行われているのが分かる。シミュレーションによる駅別モノレール利用者数と実データとの相関係数は 0.92 となり、高い相関があることが確認できた。

表 5 各交通機関利用者数 (人)

Table 5 Ridership of each transport

交通手段	シミュレーション	実データ
自家用車	1655605	1788586
路線バス	100270	91122
モノレール	25628	25820
徒歩	424864	543544

表 6 ゾーン間分担交通量

Table 6 Modal Split between zones

交通手段	サンプル数	相関係数	誤差率 (25%以下)
自家用車	1156	0.93	68%
徒歩	377	0.92	83%
モノレール	336	0.86	87%

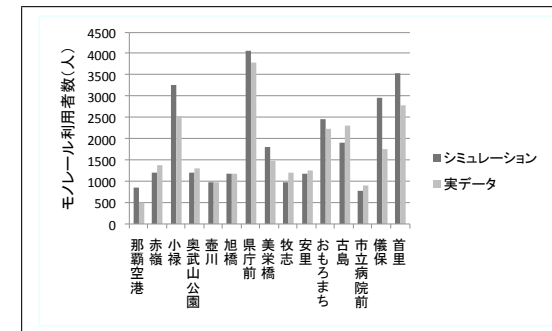


図 3 駅別モノレール利用者数

Fig.3 Monorail ridership of each station

4. デマンドバス需要予測シミュレーション

一般的にデマンドバスは運行形態によって以下の 3 種類に分類される。

- 寄り道タイプ … 固定路線が決められており、需要に応じて寄り道する。
- セミデマンドタイプ … 利用可能性の高い場所に停留候補地を設け、候補地に向かう需要を処理する。

表 7 デマンドバスサービスレベル
 Table 7 Level of Service

交通手段	LOS 設定方法
デマンドバス	<ul style="list-style-type: none"> ・主要な一般道のネットワークを利用 ・バス速度=(制限速度+a)b より算出 ($\alpha = 10, \beta = 0.7$) ・旅行コストは, BPR 関数 (式 1) より算出 ($\alpha = 0.5, \beta = 4$) ・利用需要を満たせるだけのバス台数が確保できると仮定 ・全てのデマンドに同じ遅延時間が生じると仮定 ・デマンドバスの待ち時間はかからないと仮定

表 8 シミュレーション条件
 Table 8 Simulation conditions

場所	沖縄県中南部
OD データ	平成 18 年 沖縄県 PT 調査 (全手段, 全目的)
総トリップ数	2195994
交通手段	自家用車・モノレール・徒歩・デマンドバス

表 9 デマンドバス利用需要
 Table 9 Demand of Demand-Responsive Transit

遅延時間 (分)	利用者数 (人)
5	1867622
10	968854
15	774277
20	553773

表 10 他の交通機関の利用者数の変化
 Table 10 Simulation result

	デマンドバス導入前	デマンドバス導入後 (遅延時間=5)
自家用車利用者数 (人)	1655605	4904
徒歩	424864	325727
モノレール	25628	8114

● フルデマンドタイプ…あらゆる場所を出発地・目的地として需要を処理する
 本研究では, フルデマンドタイプのデマンドバスを想定している. デマンドバス需要予測シミュレーションとして, 沖縄県那覇市とその周辺において, 現在の固定路線バスを廃止し, フルデマンドバスを導入した場合における需要をシミュレーションにより算出した. デマンドバスの LOS は表 7 の通りである. シミュレーション条件は表 8 のようになっている. OD データは先ほどと同様平成 18 年 沖縄県 PT 調査全目的全手段の OD を使用している. デマンドバス料金を市外線固定路線バスの料金を同じように設定した場合において, 遅延時間 (実移動時間-最短経路移動時間) が 5・10・15・20 分かかると仮定した場合のそれぞれのデマンドバス利用需要を算出した. デマンドバス利用需要算出結果を表 9 に, 他の交通機関の利用需要の変化を表 10 に示す.

4.1 シミュレーション結果の考察

デマンドバスの遅延時間を変化させたシミュレーションでは, 遅延時間は大きくなるほど利用者が減少しており, より遅延時間を小さくするスケジューリングアルゴリズムを導入することが十分な需要獲得のためには必要であると考えられる. また, 他の交通機関の利用者数の変化では, 各交通機関からデマンドバスへのモーダルシフトが確認できる. この結果より, 遅延時間が 5 分程度で出発時間に必ず到着するデマンドバスが実現できれば, デ

マンドバスが自家用車にかわる主要な交通機関となる可能性があると考えられる. しかし, 実際は待ち時間, 大幅な遅延時間が発生すると考えられ, バス台数も限られているため, これほどの需要は見込めないと考えられる. そのため, Dial-a-Ride 問題を実際に解いてのコスト算出が今後の課題である.

5. 今後の研究

今後の研究として, 実際に Dial-a-Ride 問題を解いて各デマンドのデマンドバス利用コスト算出を行い, より精度の高い需要算出を目指す. デマンドバスへのデマンド配分方法は, 事前予約によってあらかじめ全デマンドを把握し運行計画を作成するバッチ処理方式により行う. デマンドの車両割当, デマンドバスの経路算出に関しては太田ら¹⁰⁾が採用している逐次最適挿入法を用いて準最適解を求める.

5.1 逐次最適挿入法

逐次最適挿入法では, デマンドは出発地点と目的地の二つの情報に分割され, デマンドバスはそれらの情報を経由地点リストとして保持する. 以下に逐次最適挿入法によるデマンド処理の流れを示す.

- (1) 各バスは, 現時点において保持している全デマンドの輸送にかかる達成予定時刻を算出する
- (2) 新たなデマンドに対し, 各バスは挿入コストが最小となる挿入位置を求める. 挿入コ

ストとは、(1)で計算した達成予定時刻とデマンド挿入後の達成予定時刻の差と新規デマンドの遅延時間を加算した値である

- (3) 各バスの算出した挿入コストの中で、最もコストが小さいバスにデマンドを配分する
- (4) 全デマンドの配分が終了すれば、各バスは経由地点リストを最短で通る経路を算出する

5.2 デマンドバス需要算出

デマンドバスの需要算出は、利用者均衡配分と逐次最適挿入法を組み合わせで行う。

- (1) 最短で着くと仮定したデマンドバスを含めたロジカルネットワークにおいて利用者均衡配分を行う。(デマンドバスを利用しない需要の足切り)
- (2) デマンドバスを利用する需要に対して、逐次最適挿入法を行い、厳密なデマンドバス利用コストを算出する。
- (3) 算出されたデマンドバス利用コストに基づき、各デマンドに対応したロジカルネットワークを生成し、利用者均衡配分により需要算出を行う。
- (4) 収束しなければ(2)に戻る。収束すれば終了する。

6. おわりに

本研究では、デマンドバスの需要予測シミュレーションをマルチモーダル交通シミュレータを用いて行った。まず本研究で用いる我々の開発したマルチモーダル交通シミュレータの現況再現性評価を行った。シミュレーションにより配分した交通量と交通センサスによって集計された実データとの相関を算出し、高い現況再現性があることを示した。次に、公共交通機関を含んだ交通配分の評価を行うために、モノレール、徒歩を含んだ交通配分を行い、自家用車、徒歩、モノレールのBゾーン間の交通量を実データと比較し、相関のある交通手段選択が行われていることを示した。さらに、各駅のモノレール利用者数をシミュレーションにより算出し、各駅において高い相関が得られ、モノレールを含む交通配分において現況再現性が高いことを示した。デマンドバスの需要予想シミュレーションとして、沖縄県中南部において、現状の固定路線バスを廃止し、デマンドバスを導入した場合における需要の算出を行った。シミュレーションの結果、固定路線バス比べ、フルデマンドバスを導入した方がバス利用需要の増加が見込め、交通渋滞の緩和、旅行時間の減少が期待できるという結果となった。

本需要予測シミュレーションにより、運営側は、デマンドバスの料金設定や、経路算出アルゴリズムによりどの程度需要が想定できるか判断することができ、デマンドバス導入を円

滑に行うことが可能である。

今後の研究としては、デマンドバス間の乗り継ぎを考慮したデマンドバスシステム、固定路線バスと連携したデマンドバスシステムなどより複雑なデマンドバスシステムに関する利便性の評価を行う。また、今回はフルデマンドバスをみのシミュレーションを行ったが、寄り道タイプやセミデマンドタイプを導入した場合のシミュレーションを行う必要がある。

参考文献

- 1) :平成17年度 道路交通センサス沖縄県における自動車 OD 調査報告書, 沖縄総合事務局開発部道路建設課.
- 2) :第3回沖縄本島中南部都市圏パーソントリップ調査報告書, 沖縄中南部都市圏総合都市交通協議会 (2009).
- 3) 赤嶺有平, 遠藤聡志: 那覇通勤圏における交通シミュレーションを用いた車々間通信とVICSの比較, 2008年度人工知能学会全国大会(第22回) 論文集 (2008).
- 4) 土木学会(編): 道路交通需要予測の理論と適用 第一編利用者均衡配分の適用に向けて, 土木学会.
- 5) 林 光伸, 湯沢 昭: デマンドバス導入のための需要予測と運行形態の評価に関する一考察, 都市計画論文集, Vol.41, No.3, pp.55-60 (2006).
- 6) 松井 寛(編): 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—, 土木学会.
- 7) Nagel, K. and Schreckenberg, M.: A cellular automaton model for freeway traffic, *J. de Phys. I France* 2, pp.2221-2229 (1992).
- 8) 中谷昭彦, 藤田 聡: デマンドバスシステムのための最適経路選択法の実装とそのオンライン配車システムへの応用, 情報処理学会研究報告, No.115, pp.231-238 (2002).
- 9) 野田篠田孝祐, 太田正幸, 中島秀之: シミュレーションによるデマンドバス利便性評価, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.242-252 (2008).
- 10) 太田正幸, 篠田孝祐, 野田五十樹, 車谷浩一, 中島秀之: 都市型フルデマンドバスの実用性, 情報処理学会高度交通システム研究会研究報告, Vol.2002 (2002).
- 11) 境 周平, 若林竜太, 内村圭一: デマンドバスの運用面積に関する考察, 情報処理学会研究報告-高度交通システム, Vol.2-4 (2000).
- 12) 高橋勝美: 沖縄本島中南部都市圏におけるBPR関数の検討, 日本道路会議論文集, Vol.25 (2003).
- 13) 内村圭一, 前田竜士: 動的な交通情報を用いたリアルタイム Dial-a-Ride システムの構築, 電子情報通信学会論文誌A, Vol.j88-A, No.2, pp.277-285 (2005).
- 14) 内村圭一, 斉藤隆司, Takahashi, H.: 公共交通サービスにおける Dial-a-Ride 問題, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.j81-A, No.4, pp.559-606 (1998).