

デマンド応答型交通システムに関するシミュレーション分析*

Simulation Analysis on the Characteristics of Demand Responsive Transport Systems*

倉内文孝**・米山真未***・高木朗義***・原尾彰****

By Fumitaka KURAUCHI **・Mami YONEYAMA***・Akiyoshi TAKAGI***・Akira HARAO****

1. はじめに

近年、ICT（情報通信技術）を活用した新しい交通機関であるDRT（デマンド応答型交通システム）が中山間地域を中心に高齢者などの交通機関確保を目的として普及してきた。DRTとは、利用者の予約に応じて経路や時刻を変更する交通機関であり、ドア・トゥー・ドアのサービスや広範囲にサービス提供が可能である。しかし、事前に十分な検討が行われずに導入されることが多く、その結果DRTにかかる維持費や採算性の低さに苦勞する自治体も多い。DRTは地域の居住特性や地理条件により効率性が変化するため、それらを踏まえた事前の効果検討が必要である。また、乗合による迂回など乗客の意思決定がDRTのサービス内容に影響を与え、さらに、乗客は利用の繰り返しによりDRTの善し悪しを判断する。本研究では、乗客の学習や相互作用を考慮するために開発したシミュレーションシステムを用い、乗客、DRT、地域を様々に設定し、計算を行った結果からDRT導入の効果を考察する。

近年のDRTの導入が増加していることを受け、導入事例を整理分類する試みが近年行われてきている。たとえば、元田ら¹⁾や原、秋山²⁾は、DRTの分類を行い、DRTの適用範囲について導入に適する地域をあげている。また、所与の需要に対して以下に効率的に車両を割り当てる問題は、Dial-a-Ride Problemと呼ばれ、様々な条件での最適化アルゴリズムを求める研究が行われてきた。たとえば、野田ら³⁾は、遺伝的アルゴリズムの手法を応用して、準最適経路を求める方法を提案している。また、筆者らも、逐次割り当てを前提としたDRT車両の割り当てアルゴリズムを提案⁴⁾している。これらは乗客需要を固定的に扱っており、料金とサービスレベルの関係について考慮されていない。本研究では、シミュレーションを用いた分析を行っているため、解の唯一性は保証されないが、柔軟かつ現実的な設定が可能なのが本研究の特長である。

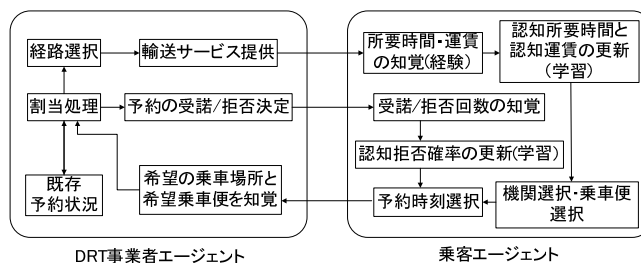


図1 エージェントの設定と概要

2. マルチエージェントシミュレータの概要⁵⁾

エージェントとは、環境の状態を知覚し、行動によって環境に影響を与えることのできる自律的主体のことである。マルチエージェントシミュレータとは、複数のエージェント間の関係を簡単なルールで記述することで複雑な相互作用を表現し、その結果全体としてどのような現象が起こるかを考察することができるものである。また、その際主体の多様性や学習を考慮できるという特長をもつ。本研究で用いるシミュレータには、図1のような相互関係をもつ乗客エージェントとDRT事業者エージェントが実装されている。事業者は、予約状況に空きがあれば予約受諾、なければ拒否する。乗客は、所要時間を含むコストを最小化するように機関と便選択をする。また利用のたびに所要時間・運賃・予約拒否回数を学習し、次の意思決定に活かす。選択を繰り返した結果、DRT導入時の利用状況やそれに伴い得られる収入と支出の関係などが得られる。

3. 評価の視点

本研究では、利用者と事業者の視点からDRTの効果を分析する。まず利用者の視点から、DRTの導入により、DRTがない（交通機関がタクシーのみ）場合に比べ、乗客の所要時間を含むコストの変化分で消費者余剰を求める。ここで、導入効果が一部の利用者に集中している可能性も否めないが、DRTは公共交通機関であり、地域に平等なサービスを提供することが望まれる。そのため、乗客全員の消費者余剰が等しい（最も平等なDRTサービスが実現している）状態との差を表すジニ係数を用いた評価も行った。ジニ係数が小さい値であるほど平等であることが示される。一方、事業者の視点から、表1を参考に費用を設定し、DRTの料金収入と運営費用の差で生産者余剰を求める。消費者余剰と生産者

*キーワード：マルチエージェントシミュレータ、DRT、特性評価

**正員，博（工），岐阜大学工学部社会基盤工学科（岐阜市柳戸1-1，058-293-2443，kurauchi@gifu-u.ac.jp）

***正員，JR西日本コンサルタント株式会社

****正員，博（工），岐阜大学工学部社会基盤工学科

****正員，修（工），中日本高速道路株式会社

余剰の和で社会的余剰を求める。

4. 仮想ネットワークにおける試行計算

(1) 計算の設定

地域形状が DRT 効果に与える影響をみるため、図 2 のようなリンクコストの違う 3 つのネットワーク①全てのリンクコスト 3 (分/本)、②縦のリンク 2 (分/本)、横のリンク 4 (分/本)、③縦のリンク 1 (分/本)、横のリンク 5 (分/本) を対象としてそれぞれ試行計算を実行する。どのネットワークも DRT の起点はノード 11、終点はノード 26 とする。この 2 つのノードを除く 24 個のノードのそれぞれが乗客 (1 人) の起点であり、乗客全員の下車地点をノード 26 とした。DRT 車両は、1 日 3 便運行し、10 時、11 時、12 時にノード 11 を出発しノード 26 に到着する。料金は 300 円、車両容量は 4 名である。乗客全員の需要発生確率を 0.5 (回/日)、希望到着時刻を 12:30、単位遅延コストを 200 (円/分)、単位早着コストを 10 (円/分)、時間価値を 50 (円/分) として 500 日間のシミュレーションを行った。乗客は早着コスト、遅延コスト、移動コスト、料金を含めた総コストを最小化するように交通機関を選択する。DRT を利用しない選択肢としてタクシーを使用可能であり、この場合のコストは 3 千円とする。

(2) ネットワーク形状による効果

まずは、ネットワーク形状により計算結果がどのように変化するかを考察する。500 日のシミュレーション中の最後 300 日間の分析結果より、ノード別に 12 時発の DRT の利用率を図 2 に示す。迂回が発生しなければ、乗客全員 12 時の便が最適にもかかわらず、ネットワーク 1 の結果を見ると、ノードによって 12 時発の DRT 利用率に差があることがわかる。起点と終点を結ぶライン上の乗客が 12 時の便を利用する比率が高く、そこから離れるほど利用率が低くなっている。これは、起終点を結んだラインから遠いノードは、乗客の乗り合わせによって極端な迂回のため希望到着時刻を大きく越えてしまうことが起こりやすく、利用便を早める傾向があるためである。このように端のほうの人が早い段階で早い便を利用しはじめる結果、起終点を結んだライン上の人には所要時間が安定し、希望時刻に間に合うため、12 時便を利用することになる。同様に、図 2 のネットワーク 2 や 3 を見ると、ネットワークの形状が細長いほどノードごとの 12 時発の利用率の差が小さくなっている。ネットワークの形状が細長いほど端のノードの人でも極端な迂回が起こりにくく、ノードごとに所要時間の差がでにくいためである。表 2 に示したジニ係数をみても、ネットワークが細長いほどその値が小さく、細長い地域のほうがより平等なサービス提供が可能であるといえる。こうして細長いネットワークでは、乗客の遅延コストや

表 1 DRT 資本費用および運営費用⁶⁾

| 分類項目 | 内容 | 費用 | 単位 |
|----------------|--------------|-----------|--------|
| 資本費用 (固定費用) | システム賃賃料 | 3,480,000 | [円/年] |
| | 通信費 | 1,100,000 | |
| | 車両の原価償却費(9人) | 412,830 | |
| | 人件費(一人当たり) | 4,000,000 | |
| | 合計 | 8,992,830 | |
| 運営費用 (可変費用) | 燃料油脂費 | 33 | [円/km] |
| | 車両修繕費 | 19.54 | |
| | その他諸経費 | 91.83 | |
| | 合計 | 144.37 | |

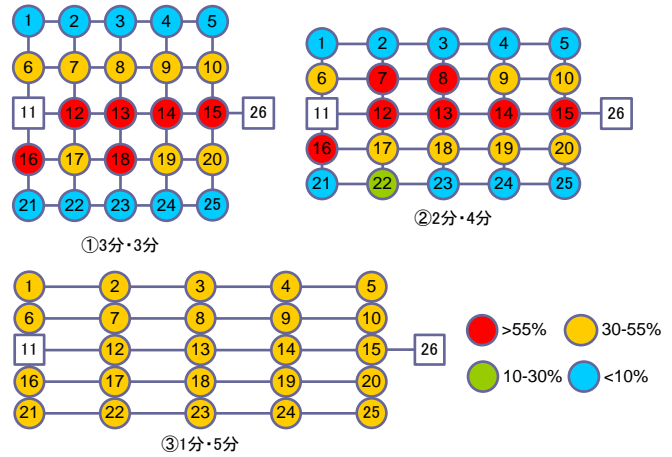


図 2 ノード別 12 時便の利用率

表 2 ネットワーク別ジニ係数

| ネットワーク | 1 | 2 | 3 |
|--------|--------|--------|--------|
| ジニ係数 | 0.0699 | 0.0645 | 0.0521 |

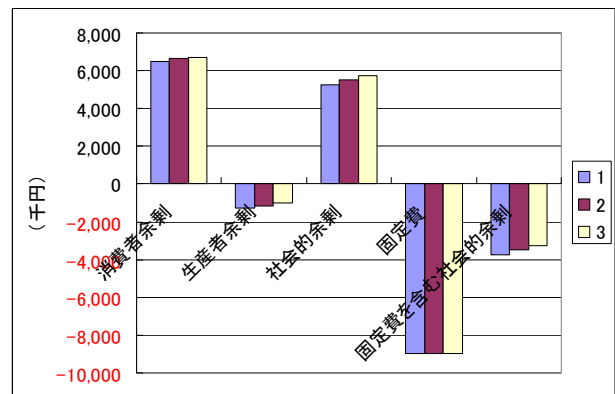


図 3 ネットワーク形状別各余剰

表 3 ネットワーク別運休回数

| ネットワーク | 1 | 2 | 3 |
|--------|-------|-------|-------|
| 運休回数 | 12.8回 | 18.2回 | 21.8回 |

早着コストが抑えられるため、図 3 のように消費者余剰がより大きくなる。また、細長いネットワークでは、乗客が利用便を早める傾向が少ないため、需要が集中し表 4 のように DRT の運休回数が多くなる。よってネット

ワークの形状が細長いほど生産者余剰が大きく効率的な DRT の運行ができるといえる。

(3) DRT 料金による効果

次に、DRT の利用料金の影響を考察する。ネットワーク 1 に対し、DRT 料金を 100~700 円まで 200 円間隔で計算を行った。分析の結果、各余剰を図 4 に示す。ここで、社会的余剰の最大となる DRT の料金を求めることで、利用者・事業者にとって最適な料金が得られることを期待したが、分析の結果 DRT 料金を変化させても社会的余剰に大きな差は生じなかった。本研究の計算条件は、DRT 料金を変化させても消費者余剰と生産者余剰の変化分が打ち消しあってしまい、社会的余剰に大きな変化は起こらなかった。おそらく DRT 車両を 4 名定員と仮定したことによる可能性があり、今後異なる条件での計算を実施する必要がある。

(4) タクシー料金による効果

次に、タクシーの料金に対する計算結果の感度を分析する。ネットワーク 1 に対し、タクシー料金を 2 千円、3 千円、4 千円で計算を行った。そのときの各余剰を図 5 にまとめた。タクシー料金は乗客の目的地までの利便性とみることができ、地域の利便性が DRT 効果に与える影響をみることができる。図 5 よりタクシー料金が高い、すなわちもともと不便な地域ほど消費者余剰が大きいことがわかる。これは、タクシー料金が高くなった分 DRT を利用することによる余剰が乗客それぞれに対して大きくなったと考えられる。さらに、乗客一人ひとりの余剰が大きくなったため、消費者余剰の乗客間での相対的な差が小さくなり、表 4 のようにジニ係数が小さくなった。従って、不便な地域ほど DRT の効果は乗客にとって大きく、平等になるといえる。一方で、今回の計算結果においては、生産者余剰の変化は大きくない。これは、今回の計算では空走時の費用を計上していないためと考えられ、改良を要する点といえる。

(5) 発生需要による効果

乗客発生需要による変化をみるために、ネットワーク 1 に対し、乗客の需要発生確率を 0.1 と 0.5 の場合を設定し計算を行った。そのときの各余剰を図 6 にまとめた。需要発生確率 0.1 では、需要が少ないため DRT の 11 時便と 12 時便でほぼまかなうことができる。ここで、前に述べたように乗客は始め最適な便である 12 時便を希望する。しかし、DRT 起終点から離れたノードに住む乗客は希望到着時刻から遅れることによって希望便を早めて 11 時便を利用するようになる。この計算ケースでは発生需要が小さいため、乗客が予約を行った際、DRT の予約状況に空きがなく拒否されるということが起こりにくい。また、発生需要が小さいため乗り合わせ人数も少なく、所要時間も短くなる。これらのことから、11 時便を利用した人には早着コストが大きくかかり、12 時便

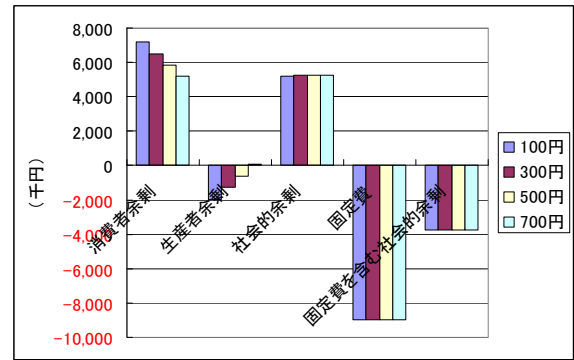


図 4 DRT 利用料金別各余剰

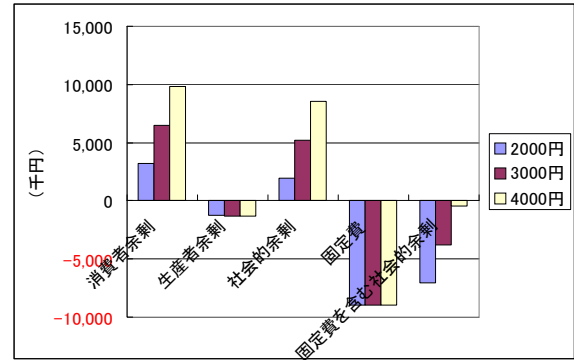


図 5 タクシー料金別各余剰

表 4 タクシー料金別ジニ係数

| タクシー料金 | 2000円 | 3000円 | 4000円 |
|--------|--------|--------|--------|
| ジニ係数 | 0.1458 | 0.0699 | 0.0426 |

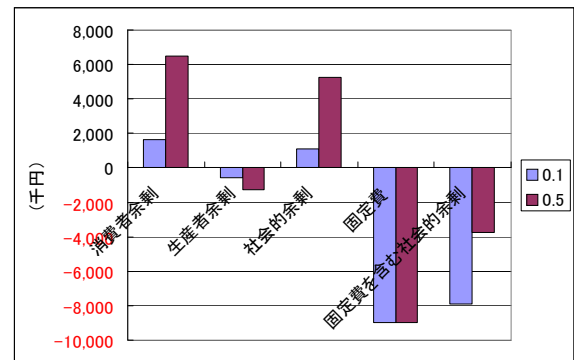


図 6 需要発生確率別各余剰

表 5 需要発生確率別ジニ係数

| 需要発生確率 | 0.1 | 0.5 |
|--------|--------|--------|
| ジニ係数 | 0.0956 | 0.0699 |

を利用した人には遅延コストがかかりにくいことになる。その結果、11 時便を希望する人と 12 時便を希望する人の間で消費者余剰に大きな差が生じる。以上のようなことより、表 5 のように需要発生確率 0.1 ではジニ係数が大きくなり、平等なサービスが行われていないことになった。また、需要が少ない場合でも DRT の運営コスト

は同じようにかかるため、少ない乗客のために同じコストをかけることになり、効率的な DRT の運行が難しいことになる。以上のことから、需要の小さい地域では、DRT を導入する際、サービスの平等性や運営コストについて慎重に検討する必要があるといえる。

(6) 運賃変動制の導入による効果

最後に、シミュレータでは柔軟な料金設定が可能であることを受け、乗り合わせの人数によって運賃を変動させる、運賃変動制を導入したケースについて考察を加える。ネットワーク 1 に対し、需要発生確率 0.1 (回/日)、遅延コスト 50 (円/分)、早着コスト 5 (円/分) と需要が少なく、時間的制約の低い地域を設定した。また、DRT 料金を乗り合わせの人数により 1 人:800 (円/人)、2 人:700 (円/人)、3 人:600 (円/人)、4 人:500 (円/人) とし、乗り合わせの人数が多いほど利用者にとっては安く、事業者にとっては利益が大きくなるように設定した。運営方法は、需要があったときのみタクシーを借りて運行する方式をとることとし、資本費用 4,580,000 (円/年)、運営費用 500 (円/km) として計算した。これにより需要が少ない地域での効率的な DRT 運行の可能性をみた。分析の結果、各余剰を図 7、運休回数を表 6 に示す。運賃変動制では、乗客は学習によって乗り合わせの人数が多い便を選択することで料金が抑えられ、固定料金と比べ消費者余剰が大きくなる。また、そのように乗客が進んで乗り合わせるため需要が集中し、DRT の運休回数が増えるため運営コストが抑えられ、生産者余剰も大きくなる。よって、需要が少なく時間的制約の低い乗客の地域では、運賃変動制によって効率的な運営の可能性があると見える。

5. おわりに

本研究では、乗客の相互作用などを考慮可能なマルチエージェントシミュレータを用いた DRT 導入効果の把握を目指し、乗客、地域、DRT などを様々に設定した計算結果を示した。ここでは、ネットワーク形状、DRT 料金、タクシー料金、乗客の発生需要、料金体系を変化させて分析し、次のことがわかった。

- ・ 細長い地域ほど乗客に平等なサービスが可能となり効率的な運行が可能である
- ・ DRT 料金の影響に関して、社会的余剰に大きな変化は見られなかった
- ・ タクシー料金を地域の利便性とみた影響として、もともと不便な地域ほど利用者にとって DRT の効果が大きく、平等である
- ・ 乗客の発生需要の影響として、需要の少ない地域では、乗客間で利用便が分かれてしまい、DRT 効果の差が大きくなる
- ・ 運賃変動制を導入した結果、需要が少なく時間的制

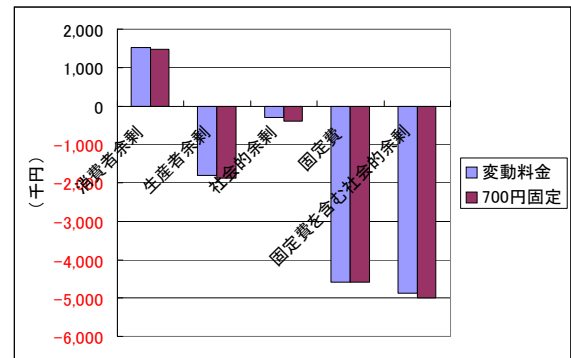


図 7 料金体系別各余剰

表 6 料金体系別運休回数

| | 変動料金 | 700円固定 |
|------|------|--------|
| 運休回数 | 589 | 562 |

約の低い人の住む地域では、変動料金とタクシーを借り入れる方法により DRT の効率的な運行の可能性はある。

このように、様々な設定のもとシミュレーションにより分析を行ったことから、DRT 導入の際に事前検討のためこのシミュレータを利用することが可能であることが示された。今後の課題としては、シミュレータの特長を活かした乗客の多様性を表現した分析、公共交通機関として適切なサービスを期待されている DRT として行政の介入を表現した分析などが考えられる。

謝辞：

本研究は、科学研究費若手研究(A) 18686042 (2006-2008) の成果の一部である。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 元田, 若林, 山口: “雫石町フレキシブルバスの運行について”, 土木計画学研究・講演集, Vol. 29, CD-ROM, 2004.
- 2) 原, 秋山: “公共交通としてのDRTの将来展望”, 土木計画学研究・講演集, Vol. 31, CD-ROM, 2005.
- 3) 野田, 太田, 篠田, 熊田, 中島: “デマンドバスはペイするか?” 情報処理学会研究報告 2003-ICS-131, 31-36, 2003.1.
- 4) Kurauchi, et al. “Study on Service Characteristics of Demand Responsive Transport Using Sequential Demand Assignment Algorithm”, International Journal of ITS Research, Vol. 3, pp. 59-68, 2005
- 5) Kurauchi, F. and Harao, A. “Multi-agent Simulation for Evaluating Demand Responsive Transport System”, Proceeding of SCIS and ISIS 2008, 768-773, 2008
- 6) 日本のバス事業2007, 日本バス協会