

利用者の交通機関選択を考慮したDRT運行計画モデルの構築*

Routing/Scheduling Model for Demand Responsive Transport Considering Passengers' Mode Choice*

倉内文孝**・Sumalee Agachai***・堀場詳二****

By Fumitaka KURAUCHI**・Agachai SUMALEE***・Shoji HORIBA****

1. はじめに

近年の情報通信技術の発展により、フレキシブルで費用効率性の高い新しい公共交通サービスとして需要応答型交通システム (Demand Responsive Transport, DRT) の導入が増えており、特に路線バスの導入が困難な過疎地における交通手段として注目を浴びている。しかしながら、DRTの導入にあたって、想定される運行コストやあるいは実現可能なサービスレベル (平均的な所要時間や待ち時間など) を事前に検討するような方法論が整備されていないのが現状である。本研究においては、想定される移動需要に対して収益最大化 (費用最小化) を実現するDRTの利用料金および運行経路を決定するDRT運行計画モデルを構築する。DRT運行事業者は、DRTを運営するために確保する車両台数、利用料金およびDRTの運行計画を決定するとし、利用者は、DRT運行事業者が示した条件の下で一般化費用を最小化する行動を行うこととして定式化を進めた。本研究のフレームワークでは、所与の地域条件を前提とした場合に、DRT運行事業者が最善を尽くしたとして実現しうるサービスレベルを算定できる。モビリティを確保するという観点については、モデル化において制約条件を付与することによって表現可能となる。その結果として、DRT運行事業者の利益は負になることも当然考えられるが、それがDRT運行に関して地域が負担すべき金額と解釈可能であり、DRT導入に際して有用な情報を提供しうるといえる。

2. DRT導入事例と既存研究

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。元田ら¹⁾は、バス運行計画の要素として路線、ダイヤ、バス

停をあげ、それらがDRTにおいて可変的となるその度合いを「固定」「半固定」「フリー」の3段階に定義し、それらの組合せにより27通りに分類し、現実性を考慮して最終的に12通りの組み合わせがあるとしている。また、竹内、中村²⁾は、DRT導入目的と各主体への影響を整理したのち、DRTの運行形態の整理として運行形態をFixed, Route Deviation, Semi Dynamic, Dynamicの4つに分け、それぞれについて特徴、利点、問題点をあげるとともに、経済性、サービス指針、技術パフォーマンスの3つの軸からの評価方法について検討している。福本ら³⁾は、乗降地点、経路、ダイヤの3項目についての自由度によりDRTを分類したものを3次元空間上にまとめて整理し、地域の形状によるDRT適用可能性の変化を考察しており、その結果長方形に近い形状であるほど相乗りの成立割合が高まることを示している。

DRTの研究としては、導入事例の整理や運行形態の分類などの他に、所与の需要に対して以下に効率的に車両を割り当てるかという数理問題を考えるものがある。これは、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⁴⁾は、遺伝的アルゴリズムの手法を応用して、準最適な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⁵⁾している。これらの研究においては、所与のOD需要に対して、車両容量を超えずかつ乗客に大きな迂回を強いることないことを制約条件とし、最も効率的な経路を探索する問題を定式化している。一方で、実際のDRTの運行を検討する際には利用料金は重要なデザイン変数であるが、料金とサービスレベルの関係について考慮されているものは皆無である。

3. モデル定式化のフレームワーク

(1) 路線バスとDRT車両の違い

DRTの大きな特徴は、その名のとおりに需要に対して柔軟に運行内容を変化させることができるという点にある。路線バスは路線、料金、車両、運転手といった要素が全て比較的長いタイムスパンにおいて決定され、決まった車両台数で基本的に毎日同じサービスを提供すると

* キーワーズ: 公共交通計画, デマンド応答型交通システム, 交通機関選択

** 正員, 博士 (工学), 京都大学工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Tel: 075-383-3235, kurauchi@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

*** 非会員, 博士 (工学), 香港理工大学

**** 正員, 修士 (工学), 日本IBM

いう形で運行を行う。一方、DRTにおいてはその設計のタイムスパンが路線バスと部分的に異なり、かつそれら設計変数のタイムスパンに応じてその運行形態が決定づけられる。例えばFull-Dynamic型のDRTでは路線は日々変更され、需要に対して運行車両台数を柔軟に変化させることが可能である。また、固定路線型とは、車両を実際運行するかどうか、という点のみに柔軟性を持たせているといえる。このような柔軟性を持たせることによりサービスレベルを維持しつつコストを削減できるような結果に結びつけば、DRTの特長を活かした運用ができていくといえる。

さらに、路線バスとDRTで大きく異なる点として需要レベルの大きさがあげられる。路線バスの運行計画においては、比較的乗客需要が大きく地域の計画を取り扱うため、あるまとまった人数のうち何割が利用するといった確率的議論をすることが可能であるが、DRTにおいては需要が大きくないために確率的な議論ができず、毎日の需要パターンに回答した運行計画の繰り返しを表現し、その結果をもとに議論しなければならない。

(2) 分析対象とするDRTの運行形態

DRTの導入事例としては、ある定められた頻度によってDRT車両が決められた起終点を結ぶものが多かった。そのため、ミーティングポイント(MP)のみで乗降可能であり、各運行において起終点を走行するSemi-dynamic型のDRTシステムを対象とすることとし、各運行回について所与の移動需要を満たす運行計画を決定することとした。このようなモデル化とすることによって、各運行回に関する運行計画決定での車両移動を動的に取り扱う必要がなくなり、計算が簡略化される。

(3) 長期計画と短期計画

前述の通り、DRTをどのように走らせるのか、その運行内容の検討を行う際的设计変数は、料金、備車台数(最大利用可能なDRT車両数)、運行経路であり、運行の結果見込まれる利用需要、収益、必要な補助金といった指標をもってその実施を検討することになる。料金や備車台数は比較的長期的な視点で見べき設計変数であり、需要に応じて簡単に変化できない。本研究では、長期計画として比較的タイムスパンが長い利用料金と備車台数を決定する問題とし、さらに短期計画問題においては利用需要および料金は所与の元、需要に応じて実際運行する車両の台数および経路について決定することとした。

4. DRT運行計画決定モデルの構築

(1) モデルのフレームワーク

先に述べたとおり、DRT運行事業者は長期計画問題

としてDRTの利用料金および導入車両台数を決定し、短期計画問題としては、各利用予約条件(想定需要)に対して所有するDRT車両を用いて最も効率的に運行が可能な計画を決定することとした。すなわち、所与の料金および車両台数のもと、運行経路を最適化する最適運行計画モデルと、最適運行計画モデルの結果を受け、利用料金および備車台数を決定する長期計画モデル解いていく構造とする。計算フローを図-1に示しておく。

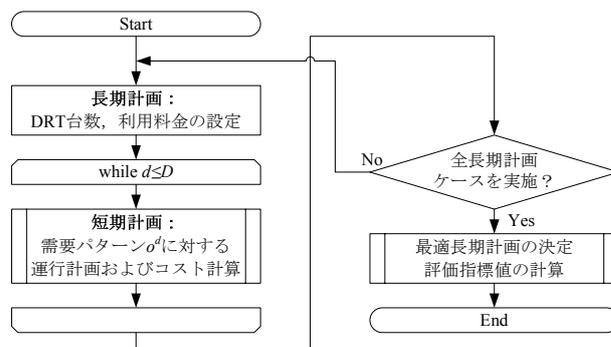


図-1 計算フロー

短期計画である日々の運行計画モデルの定式化においては、総費用を最小化することを目的とする利用者とDRT運行事業者の2者の間には次のような前提条件をおく。まず運行事業者は乗客の行動規範を知っており、乗客が選択しうる他のモード利用時のコストを把握しているとするが、乗客の行動は指定することはできない。このとき、DRT運行事業者はこれらの情報をもとに乗客の行動を予測し、最終的に目的関数を最適化することとなる。この問題は非協力ゼロ和問題の中でも先手・後手のあるStackelberg問題と定義され、プレイヤー2(利用者行動)を制約条件にもつプレイヤー1(DRT運行事業者)の最適化行動を記述した2レベル最適化問題として定式化可能である。具体的なモデル化にあたっては、以下の仮定を設定している。

- DRT車両は、Semi-dynamic型とする。利用者の乗降もバス停でのみ可能とする。ただし需要の大きさによっては運行しない、という選択肢も存在する。
- DRT車両が走行する際にはその経路に応じて運行コストが必要になる。
- DRT車両にはそれぞれ乗客定員が設定され、それを超えた乗客は乗車できない。
- DRT車両の利用料金は、ODペアごと、MPペアごと、DRT車両ごとなど柔軟に設定可能とする。これより、同一ODペアでも異なるバス停から乗車する場合には異なる料金を適用する、利用者のモビリティニーズに応じて料金を変更する、DRTの車両特性(乗車容量など)に応じて料金を変化させることなどが可能となる。

- 乗客はDRT運行業者から提示された料金および所要時間を考慮して経路選択を行う。

(2) 利用者の行動仮定

利用者は他の交通手段と比較したうえで交通機関を選択することとする。選択基準としては、所要時間と利用料金を加味した一般化費用としこれを最小とする交通機関を選択するとした。ここでは簡単に、DRTを利用しない場合の交通機関を多数分類するのではなく、ひとつの選択肢として集約した。全ての利用者が自身の選択可能な交通機関についての知識を有し、かつ混雑の影響を考慮するのであれば、この結果生じうる交通状況は利用者均衡状態となる。しかし、DRTの主たる検討対象が過疎地であることから、混雑の影響については考慮しないこととした。このような仮定をおくことで、乗客すべてが自身の一般化費用を最小にするよう行動する状態と、全乗客の総走行時間が最小の状態は一致する。

(3) ネットワークの表現方法

DRT運行計画モデルは、DRTの乗降地点の順番を決定する離散計画問題として定式化されることが多いが、本研究ではDRT車両の運行経路候補をあらかじめ準備し、それらのうちのいずれかを選択する、という構造とした。なお、DRTの特長の一つは乗り換えなしに目的地近くまで移動できることである。これを明示的に表現するために、DRT車両ごとに走行ネットワークレイヤーを準備する。従って、長期計画の意思決定とは、計算条件であるネットワークを決定づける問題ともいえる。ネットワークの記述概念について、図-2に示しておく。

(4) 変数定義

- v DRTパスが走行すれば1, そうでなければ0をとるベクトル (DRT経路候補数のベクトル)
- r DRTの運行費用 (DRT経路候補数のベクトル)
- s DRT車両の容量 (DRT車両数のベクトル)
- y^d d 運行回目の乗客の経路フロー (乗客の経路候補数のベクトル)
- t 乗客の経路 k の所要時間 (乗客の経路候補数のベクトル)
- f 乗客の経路 k の料金 (時間換算, 乗客の経路候補数のベクトル)
- o^d d 運行回目の移動需要 (ODペア数のベクトル)
- G DRTを1台備車するのに必要なコスト
- δ DRTリンク - DRTパスインシデンス行列
- θ DRT車両 - DRTパスインシデンス行列
- γ DRTリンク - 乗客パスインシデンス行列
- ϕ 乗客パス - ODペアインシデンス行列
- π DRTリンク - DRT車両インシデンス行列
- \mathcal{N}_I I のDRT車両により構成されるネットワーク
- I DRT車両数

- P DRTパス数
- K 乗客パス数
- A DRTリンク数
- D 試行運行回数

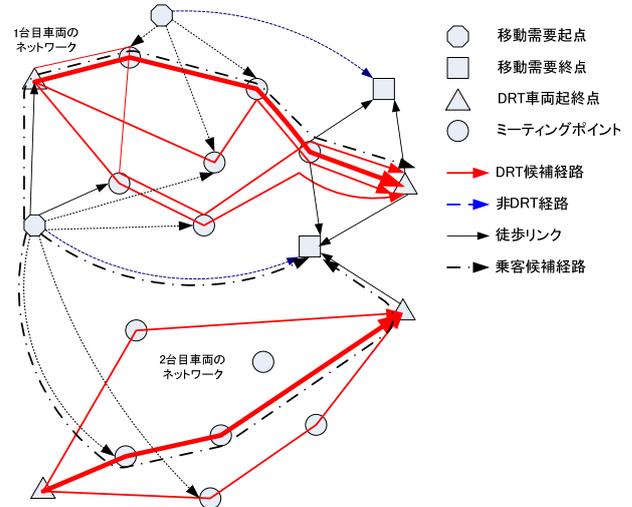


図-2 ネットワーク表記

(5) 運行計画モデル (短期計画モデル) の定式化

前節の仮定により、各運行回における短期計画問題は、上位問題をDRT事業者の費用効率性最大化 (コスト最小化) とし、下位問題を総走行時間最小化とした2レベル最適化問題となる。 d 回目の所与の利用料金およびDRT使用車両条件の元、コスト効率性が最大となる運行方法 v を決定する問題は、次の2段階最適化問題を解くものと定式化できる。

[DRT-Short-BL]

$$Z_S^d(p, \mathcal{N}_I) = \min_v (r^t \cdot v^d - f^t \cdot y^{d*}(v^d))$$

subject to

$$\Theta \cdot v^d = \mathbf{1}_{|I|}$$

$$v^d = \{0, 1\}$$

$$y^{d*}(v^d) = \arg \min_y ((t + f)^t \cdot y^d)$$

subject to

$$\Gamma \cdot y^d - \text{diag}(\Pi \cdot s) \cdot \Delta \cdot v^d \leq \mathbf{0}$$

$$\Phi^t \cdot y^d = o^d$$

$$y^d = \{0, 1, \dots, \Phi \cdot o^d\}$$

ここで、diag演算子は、括弧内のベクトルを対角要素に持つ行列への変換を意味する。また、目的関数値 Z_S^d は、設定料金およびDRTの車両数 I により変化するネットワーク形状 (\mathcal{N}_I) に依存するものとして記述している。変数は、 v および y であり、また上位問題および下位問題

ともに、線形計画問題であることから、この問題は2段階混合線形計画問題となる。

(6) 長期計画問題

長期計画問題は、(5)で示した短期計画問題の解として得られる総収入を元に、利用料金およびDRT車両数を決定する問題として考える。すなわち、以下のよう
に定式化できる。

[DRT-Long]

$$Z_L = \min_{\mathbf{p}, l} \sum_{d=1}^D Z_S^d(\mathbf{p}, \mathbf{x}_l) + I \cdot G$$

長期計画問題は、短期計画問題の目的関数の総和と、備車費用の和を最小化する問題として定式化可能である。本研究におけるモデル化においては、DRT備車車両数に応じてネットワーク形状が変化するため、長期計画問題については、総当たり法あるいはあらかじめ設定した探索候補を比較する方法を採用する。また、定式化からもわかるように、移動需要が非常に小さい場合には、DRT車両を運行させないことが最適解となるケースが生じる。それを防止するためには、DRTによる運行需要について、たとえば全体の $x\%$ の需要に対してはサービスを提供する、といった制約条件を付与することで対応可能である。

(7) 運行計画モデルの解法

上記の2段階混合線形計画問題を解くために、下位問題(総走行時間最小化問題)のキューンタッカー条件を考え、さらに相補性条件を、ダミー変数を用いて記述しなおすことで、1段階最適化問題として再定式化した。ここでは紙面の都合上詳細は省略するが、短期計画問題である運行決定モデル[DRT-Short-BL]は、次のように定式化できる。

[DRT-Short-SL]

$$Z_1(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{x}} \mathbf{c}^t \cdot \mathbf{x}$$

subject to

$$\mathbf{A}_{eq} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq},$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$$

$$\mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u,$$

$$x_1, \dots, x_{p+2k+4} \in \mathbf{Z}(\text{integer variables})$$

ただし、

$$\mathbf{x} = (\mathbf{v} \quad \mathbf{y} \quad \eta \quad \kappa \quad \lambda \quad \mu)^t,$$

$$\mathbf{c} = (\mathbf{r} \quad -\mathbf{f} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0})^t,$$

$$\mathbf{x}_l = (\mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad -\infty)^t$$

$$\mathbf{x}_u = (\mathbf{1} \quad \Phi \cdot \mathbf{0} \quad \mathbf{1} \quad \mathbf{1} \quad \infty \quad \infty)^t$$

$$\mathbf{A}_{eq} = \begin{pmatrix} \Theta & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Phi^t & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b}_{eq} = \begin{pmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\Gamma^t & -\Phi \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{|K|} & M\mathbf{I}_{|K|} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -M\mathbf{I}_{|K|} & \mathbf{0} & \Gamma^t & \Phi \\ -diag(\Pi \cdot \mathbf{s}) \cdot \Delta & \Gamma & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & M\mathbf{I}_{|L|} & \mathbf{I}_{|L|} & \mathbf{0} \\ diag(\Pi \cdot \mathbf{s}) \cdot \Delta & -\Gamma & \mathbf{0} & -M\mathbf{I}_{|L|} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{b} = (\mathbf{t} + \mathbf{f} \quad M\mathbf{1} \quad -(\mathbf{t} + \mathbf{f}) \quad \mathbf{0} \quad M\mathbf{1} \quad \mathbf{0})^t$$

である。この問題は混合整数線形計画問題(Mixed Integer Linear Programming Problem, MILP)となる。MILPは整数計画問題を含んでいるため、特に大規模な問題においてはその解を求めることは困難であるが、近年様々なソルバーが市販されており、それらを活用して求解することが可能である。本研究では、Matlab[®]を活用し解を求めている。

本稿においては、DRTの運行計画を料金設定と同時に考慮し、利用者の行動を考慮可能なモデル化を提案した。現在簡単なテストネットワークにおいて試行計算を行っている。その結果については講演時に報告する。

【謝辞】

本研究は、文部科学省科学研究費・若手研究「多様な料金体系・サービス形態を前提とした次世代型公共交通システムに関する研究」(平成18~20年度採択)の研究成果の一部である。また、問題のフレームワーク設定においては、土木計画学小委員会・「生活交通サービス研究」小委員会(代表：喜多秀行教授)での議論が非常に参考になった。ここに記して深謝いたします。

【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) 竹内, 中村: “ 運行形態別DRT システムの導入効果の評価について ”, 土木計画学研究・講演集, Vol. 31, CD-ROM, 2005.
- 3) 福本, 吉田, 加藤, 秋山: “ 地域条件に応じたDRTシステムの設定に関する基礎的検討 ”, 土木計画学研究・講演集, Vol. 33, CD-ROM, 2006.
- 4) 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.
- 5) F. Kurauchi, K. Ueshima and Y. Iida: “Study on Service Characteristics of Demand Responsive Transport Using Sequential Demand Assignment Algorithm”, International Journal of ITS Research, Vol. 3, pp. 59-68, 2005