

過疎地におけるオンデマンドバス運用モデル

鳥取大学大学院工学研究科 曳野 泰広 (Yasuhiro Hikino)
株式会社サクラサクセス 細木 貴弘 (Takahiro Hosoki)
鳥取大学大学院工学研究科 小柳 淳二 (Junji Koyanagi)
鳥取大学大学院工学研究科 得能 貢一 (Koichi Tokuno)

1 はじめに

路線バスは最寄に鉄道駅がない地域の住人や、自家用車を持たない方々にとっては便利な行動手段である。特に過疎地域では高齢者が多く、免許を持たない高齢者の方々にとっては必要不可欠なものである。この状況下で、要求の有無にかかわらず運行する定時刻・定路線型のバスではなく、利用者の要求に応じて運行させるデマンドバスに注目が集められている。これは、時刻表に基づき決まった路線を走る通常のバスでは利用者がいない場合にも運行するため、効率が悪く赤字拡大の原因となるためである。

デマンドバスの運行方法は運行する地域の特性やニーズによって様々である。予約の必要の有無、運行ダイヤの有無、運行経路の固定・非固定、などがあり、基本的なデマンド形式のバス運行の特徴としては家の近くで乗り降りでき、乗り合いを主とする需要対応型であるという点である [1], [2], [3]。

本研究では、中心地と単路線上に存在する居住地を結ぶバス路線を扱い、1 路線上に 2 種類のデマンドバスを運行する場合を考える。離散時間のマルコフ過程により、漸化式を用いて総期待乗車人数の計算を行う。一種類目のデマンドバスは、運行ダイヤがなく、要求があった場合はすぐに運行する形態のタクシー型のフルデマンドバス（以下タクシー型）であり、二種類目は、あらかじめ運行ダイヤが決まっており、要求があった場合は、運行ダイヤに従って運行する形態の定時定路線型デマンドバス（以下バス型）である。バス型、タクシー型をどのように運用すべきかを検討するために、離散時間モデルにより、漸化式を用いて期待乗車人数を算定する方法を提案する。本研究では、バス型 1 台の運用、タクシー型 1 台の運用、バス型 1 台とタクシー型 1 台の同時運用、これら 3 つの場合の期待乗車人数を算出し、比較する。

2 運行路線と運行形式

運行ダイヤのある定時定路線型のデマンドバス（バス型）と、中心地から要求があった地点までを往復し、運行ダイヤのないフルデマンドバス（タクシー型）の 2 種類のデマンドバスを考える。運行路線や運行形式については以下を仮定する。

1. 中心地（地点 0）と単路線上に存在する居住地を結ぶバス路線を考え、各居住地に停留所は 1 つとする。車両は中心地で待機し時刻表や要求に応じて居住地に向けて発車する。
2. 各居住地間の距離は一定で、中心地から 1 離れた地点を地点 1 として、最も遠い地点を n とする。離散時間モデルを考え、バスは 1 区間を 1 単位時間で移動する。
3. バスの停車時間や、乗客の乗車時間は無視できる（時間 0）ものとする。

4. 利用者全員が中心地を目的地とし途中下車はないものとする。本研究では中心地から居住地への帰りの交通は考慮しない。

タクシー型のバスの運行は以下を仮定する。

1. 待機状態のとき要求があった場合、要求地点へ向かい、到着すると客をのせ中心地へ戻る。そのため、要求発生地点を j とすると、発車して帰ってくるまでの時間は $2j$ となる。
2. 複数の地点から同時に要求がきた場合、遠い地点を優先してバスを運行させる。

バス型のバスの運行は以下を仮定する。

1. 運行ダイヤとして、時刻 t に中心地を出発する場合、最も遠い地点 n に時刻 $t+n$ に到着し、そこから中心地に向い、帰り道に乗客をのせて、中心地に運ぶ時刻表を考える。したがって地点 j の時刻表は $t+2n-j$ に中心地に向けて出発する時刻表となる。
2. 運行は要求のあったうち、最も遠い地点まで運行し、そこで時刻表の時間まで待機し、中心地に向う。すなわち、時刻 t に発車するバスに対してもっとも遠い要求地点が j ($j < n$) のとき、地点 j に $t+j$ に到着し、 j 地点でのバス発車時刻 $t+2n-j$ になるまで $2(n-j)$ 時間待機し、時刻 $t+2n-j$ に中心地に向けて出発する。

3 需要発生分布

需要発生についてはタクシー型に対する需要を基準にする。各地点、各時刻に対して、需要数を確率変数とするとき、地点 i の需要により、時刻 t に中心地を出発するタクシー型バスが k 人の乗客を地点 i で乗車させる確率 $P(k)$ はパラメータ $\lambda(i, t)$ のポアソン分布（各地点、各時刻に関して独立）に従うものとする。すなわち

$$P(k) = \frac{\lambda(i, t)^k}{k!} e^{-\lambda(i, t)} \quad (1)$$

である。このとき、地点 i でバスに乗車し、中心地に向って出発する時刻は、 $t+i$ であり、中心地に到着する時刻は $t+2i$ となる。

バス型については、時刻 t に中心地を発車するバスは、地点 i を時刻 $t+2n-i$ に中心地に向かい出発することになる。これはタクシー型では時刻 $t+2(n-i)$ に地点 i の要求により出発し、時刻 $t+2n-i$ に客を乗せる場合に相当する。よって時刻 t に発車するバス型のバスを希望する人数分布はパラメータ $\lambda(i, t+2(n-i))$ のポアソン分布に従うとする。バス型については、時刻表が決まっているために利用者が希望する時間より多少ずれた時間でも乗車すると考え、本来1単位時間遅いバスを希望する需要も早い目に時間を調整することで乗車すると考えて、時刻 $t+1$ 発車のバスを希望する需要も時刻 t 発車のバスに乗るものとする。二つをあわせて、地点 i で時刻 t に中心地を出発するバス型に乗車する人数が k の確率 $Q(k)$ は

$$\lambda_b(i, t) = \lambda(i, t+2(n-i)) + \lambda(i, t+2(n-i)+1) \quad (2)$$

とすると

$$Q(k) = \frac{\lambda_b(i, t)^k}{k!} e^{-\lambda_b(i, t)} \quad (3)$$

となる。

通常の路線バスに対してバス型の運行形式は余計な運行を省くことで、よい点ばかりのようであるが、欠点としては、決められた時刻までに連絡をいれないとバスがこない場合がある。すなわち、急に発生した需要に対してはバスが利用できない可能性がある。本モデルでは、このような通常の路線バスでは満たすことのできた需要が、オンデマンドバスでは満たされない可能性があることを考慮し、この確率を $1 - \beta$ で表すこととする。すなわち、発生した需要に対し確率 β で予約が入ることとなる。ただし地点 i の需要に対して、それより遠い地点 j ($i < j$) で予約が入った場合には、地点 i の急な需要に対しても、 j からの帰りのバスに乗ることで需要を満たすことができる。

遠い地点を優先して運行することから、時刻 t に待機場所の地点 0 から地点 i に向かって出発する確率は、タクシー型においては、 i 地点で需要が発生し、それより遠い $i+1$ から n 地点まで需要が発生しない場合であるので

$$(1 - e^{-\lambda(i,t)}) \prod_{j=i+1}^n e^{-\lambda(j,t)} \quad (4)$$

となる。

バス型については、時刻 t に待機場所の地点 0 から地点 i に向かって出発する確率は、需要発生のうちバス発車時刻に間に合う確率 β を考慮して、

$$(1 - e^{-\beta\lambda_b(i,t)}) \prod_{j=i+1}^n e^{-\beta\lambda_b(j,t)} \quad (5)$$

となる。

4 システムの状態

タクシー型やバス型の予約が入る直前の状態を (i_1, j_1, i_2, j_2) とする。これはタクシー型の現在地 i_1 、目的地 j_1 、バス型の現在地 i_2 、目的地 j_2 であることを示す。例えばタクシー型が地点 3 にいて地点 4 に向かっており、バス型が地点 1 にいて地点 5 に向かっていている場合は $(3, 4, 1, 5)$ となる。このとき、1 期間後の状態は $(4, 0, 2, 5)$ となる。タクシー型は目的地 4 に到着することで、中心地 0 が目的地となり、バス型は 5 に向かって 1 から 2 に移動することを示している。

このような状態推移を表現するためにタクシー型、バス型の 1 期間後の現在地、目的地を表す関数として、タクシー型の現在地 i 、目的地 j に対して 1 期間後の状態 $f(i, j)$ 、発車時刻 s のバス型の現在地 i 、目的地 j 、時刻 t に対して 1 期間後の状態 $g_s(i, j, t)$ と置き、バス型については目的地での待機 ($i = j$ のとき) も考慮にいれ、状態推移は以下のようなようになる。

$$f(i, j) = \begin{cases} (1, 0) & i = 0, j = 1 \\ (i+1, j) & i+1 < j \\ (j, 0) & i+1 = j \\ (i-1, 0) & i > 1, j = 0 \end{cases}, \quad g_s(i, j, t) = \begin{cases} (i+1, j) & i+1 \leq j < n \\ (n, 0) & i+1 = j = n \\ (i-1, 0) & i = j, t = s + 2n - j \\ (i, j) & i = j, t \neq s + 2n - j \\ (i-1, 0) & i > 1, j = 0 \end{cases}$$

状態 (i_1, j_1, i_2, j_2) に対し、時刻 t 以後のタクシー型の期待利用者数を $V_t(i_1, j_1, i_2, j_2)$ 、バス型の期待利用者数を $W_t(i_1, j_1, i_2, j_2)$ とするとき、状態を以下の 4 通りに分けて各状態に対する漸化式を分析する。

1. $(0, 0, 0, 0)$ はタクシー型, バス型共に待機中の状態,
 2. $(i_1, j_1, 0, 0)$, $(i_1 > 0)$ はタクシー型のみ運行中の状態,
 3. $(0, 0, i_2, j_2)$, $(i_2 > 0)$ はバス型のみ運行中の状態,
 4. (i_1, j_1, i_2, j_2) , $(i_1 > 0, i_2 > 0)$ はタクシー型, バス型共に運行中の状態
- である.

5 タクシー型とバス型が両方待機中の場合

ともに待機中の場合, 現在時刻 t がバス型の発車時刻かどうかでさらに場合わけを行う.

5.1 バス型発車時刻でない場合

現在時刻 t がバス型発車時刻でない場合, タクシー型のみ要求に応じる状況である. j 地点で k 人乗車する確率は,

$$\frac{\lambda(j, t)^k}{k!} e^{-\lambda(j, t)} \quad (6)$$

となるため, 誰も乗車しない場合 ($k = 0$) では, $e^{-\lambda(j, t)}$ となる.

式 (4), (5) を考慮し, 時刻 t 以後のタクシー型の期待利用者数を $V_t(i_1, j_1, i_2, j_2)$, バス型の期待利用者数を $W_t(i_1, j_1, i_2, j_2)$ とするとき,

$$\begin{aligned} W_t(0, 0, 0, 0) &= \prod_{j=1}^n e^{-\lambda(j, t)} W_{t+1}(0, 0, 0, 0) \\ &\quad + \sum_{j_1=1}^n \prod_{j=j_1+1}^n e^{-\lambda(j, t)} (1 - e^{-\lambda(j_1, t)}) W_{t+1}(f(0, j_1), 0, 0) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_t(0, 0, 0, 0) &= \prod_{j=1}^n e^{-\lambda(j, t)} V_{t+1}(0, 0, 0, 0) \\ &\quad + \sum_{j_1=1}^n \prod_{j=j_1+1}^n e^{-\lambda(j, t)} \left[(1 - e^{-\lambda(j_1, t)}) V_{t+1}(f(0, j_1), 0, 0) + \lambda(j_1, t) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

となる. なお, 表記の都合上 $V_{t+1}(i_1, j_1, i_2, j_2)$ と $V_{t+1}((i_1, j_1), (i_2, j_2))$ は同じとする.

5.2 バス型発車時刻の場合

ここでは現在時刻 t がバス発車時刻 s と等しい場合を考える. また, 終点の n 地点の要求では出発時刻が同じになるためバス型への乗車を優先し, タクシー型が n 地点までいくことはないものとする.

$$\begin{aligned}
W_t(0, 0, 0, 0) &= \prod_{c=1}^{n-1} e^{-\lambda(c,t)} \prod_{j=1}^n e^{-\beta\lambda_b(j,t)} W_{t+1}(0, 0, 0, 0) \\
&+ \sum_{j_1=1}^{n-1} \prod_{c=j_1+1}^{n-1} e^{-\lambda(c,t)} \prod_{j=1}^n e^{-\beta\lambda_b(j,t)} (1 - e^{-\lambda(j_1,t)}) W_{t+1}(f(0, j_1), 0, 0) \\
&+ \prod_{c=1}^{n-1} e^{-\lambda(c,t)} \sum_{j_2=1}^n \prod_{j=j_2+1}^n e^{-\beta\lambda_b(j,t)} \left[(1 - e^{-\beta\lambda_b(j_2,t)}) W_{t+1}(0, 0, g_s(0, j_2, t)) + T(j_2, s) \right] \\
&+ \sum_{j_1=1}^{n-1} (1 - e^{-\lambda(j_1,t)}) \prod_{c=j_1+1}^{n-1} e^{-\lambda(c,t)} \sum_{j_2=1}^n \prod_{j=j_2+1}^n e^{-\beta\lambda_b(j,t)} \\
&\quad \left[(1 - e^{-\beta\lambda_b(j_2,t)}) W_{t+1}(f(0, j_1), g_s(0, j_2, t)) + T(j_2, s) \right]
\end{aligned} \tag{9}$$

となる。

ここで時刻 s に j 地点から要求があったという確率を考慮した j 地点での期待乗車人数

$$\begin{aligned}
&\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} (1 - (1 - \beta)^k) e^{-\lambda} \left[\sum_{l=0}^{\infty} \frac{\mu^l}{l!} e^{-\mu} (k + l) \right] \\
&+ \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} (1 - \beta)^k \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\mu^l}{l!} (1 - (1 - \beta)^l) e^{-\mu} (k + l) \\
&= \lambda_b(j, s) - (1 - \beta) \lambda_b(j, s) e^{-\beta\lambda_b(j, s)}
\end{aligned} \tag{10}$$

の計算から、 s に j 地点から要求があったという条件のもとでの、 j までの一往復による期待乗車人数は

$$\frac{\lambda_b(j, s) - (1 - \beta) \lambda_b(j, s) e^{-\beta\lambda_b(j, s)}}{1 - e^{-\beta\lambda_b(j, s)}} + \sum_{k=1}^{j-1} \lambda_b(k, s)$$

となる。これに $1 - e^{-\beta\lambda_b(j, s)}$ をかけたものを

$$T(j, s) = \lambda_b(j, s) - (1 - \beta) \lambda_b(j, s) e^{-\beta\lambda_b(j, s)} + (1 - e^{-\beta\lambda_b(j, s)}) \sum_{k=1}^{j-1} \lambda_b(k, s) \tag{11}$$

として用いている。

式 (9) の第 1, 2, 3, 4 項はそれぞれ

1. タクシー型とバス型共に要求なしの場合,
2. タクシー型のみ要求ありの場合,
3. バス型のみ要求ありの場合,
4. タクシー型とバス型共に要求ありの場合,

に対応している。

6 タクシー型のみ運行中の場合

通常のタクシーと異なり、タクシー型のデマンドバスでは、経路上の客の相乗りを想定する必要がある。目的地での相乗りは需要人数分布により考慮されているが、目的地以外の相乗りとして、本研究では以下の2つの場合の相乗りを考慮する。

相乗りできる要求発生地点を j^* とし、現在運行中のタクシー型が中心地に向うとき j^* に到着する時刻と、中心地から j^* に到着する時刻が一致するときには、相乗りする客は、中心地から来たバスに乗るのと同じ時刻にのれるために確率 1 で j^* の客は相乗り乗車し、中心地から来る場合と比べて 1 期間早く到着する場合は、確率 α で乗車するとする。この確率を現在地 i 、目的地 j と相乗り乗車地点 j^* の関数として、 $\gamma(i, j, j^*)$ で表すと

$$\gamma(i, j, j^*) = \begin{cases} 1 & 2j - i = 2j^* \\ \alpha & 2j - i + 1 = 2j^* \end{cases}$$

となる。また、 $2j - i = 2j^*$ は現在地 i が偶数のとき、 $2j - i + 1 = 2j^*$ は i が奇数のときに、 j^* となる点は 1 つに定まる。

例としては、現在地 2 目的地 5 のタクシー型に対しては $10 - 2 = 2j^*$ から $j^* = 4$ となる。これは現在運行中の車が 5 について、折り返して 4 につくまで 4 単位時間かかることから、地点 4 の客にとっては、中心地からきた車と同じ時刻に乗れるという状況となっている。

6.1 バス型発車時刻でない場合

この状態のときには、タクシー型のみ乗車人数の増加があるので

$$V_t(i_1, j_1, 0, 0) = V_{t+1}(f(i_1, j_1), 0, 0) + \lambda(j^*, t)\gamma(i_1, j_1, j^*) \quad (12)$$

$$W_t(i_1, j_1, 0, 0) = W_{t+1}(f(i_1, j_1), 0, 0) \quad (13)$$

となる。

6.2 バス型発車時刻の場合

バス型がある地点に到着する時刻は、タクシー型より遅くなるので、タクシー型に乗ろうとする乗客がバス型に乗ることはない、式は

$$\begin{aligned} V_t(i_1, j_1, 0, 0) &= \prod_{j=1}^n e^{-\beta\lambda_b(j,t)} V_{t+1}(f(i_1, j_1), 0, 0) + \lambda(j^*, t)\gamma(i_1, j_1, j^*) \\ &+ \sum_{j_2=1}^n (1 - e^{-\beta\lambda_b(j_2,t)}) \prod_{j=j_2+1}^n e^{-\beta\lambda_b(j,t)} V_{t+1}(f(i_1, j_1), g_s(0, j_2, t)) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} W_t(i_1, j_1, 0, 0) &= \prod_{j=1}^n e^{-\beta\lambda_b(j,t)} W_{t+1}(f(i_1, j_1), 0, 0) \\ &+ \sum_{j_2=1}^n \prod_{j=j_2+1}^n e^{-\beta\lambda_b(j,t)} \left[(1 - e^{-\beta\lambda_b(j_2,t)}) W_{t+1}(f(i_1, j_1), g_s(0, j_2, t)) + T(j_2, s) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

となる。

7 バス型のみ運行中の場合

バス発車時刻 s に対し $s - t + 2n = 2j_1$ または $s - t + 2n + 1 = 2j_1$ を満たす j_1 を j_1^* とする。 $j_1^* > j_2 > 0$ のときは、 j_1^* で要求があり、呼ばれていれば、バス型は j_1^* に向かっているはずなので、バス型発車時刻には j_1^* からの要求がなかったことになる。この確率は、 $e^{-(1-\beta)\lambda(j_1^*, t)}$ である。

1. バス型発車時刻以後も j_1^* から要求がなく、その他の場所からも要求がない場合（タクシー型待機のまま）
2. バス型発車時刻以後 j_1^* から k 人の要求が生じ、 j_1^* より遠い地点から要求がなくタクシー型が j_1^* へ発車する場合
3. バス型発車時刻以後 j_1^* より近い地点 j_1 からの要求があり j_1 より遠い地点から要求がなくタクシー型が j_1 へ発車する場合
4. バス型発車時刻以後 j_1^* より遠い地点 j_1 からの要求があり j_1 よりさらに遠い地点から要求がなくタクシー型が j_1 へ発車する場合

を考えると、以下の式がなりたつ。

$$\begin{aligned}
V_t(0, 0, i_2, j_2) &= e^{-(1-\beta)\lambda(j_1^*, t)} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq j_1^*}}^n e^{-\lambda(j, t)} V_{t+1}(0, 0, g_s(i_2, j_2, t)) \\
&+ \prod_{j=j_1^*+1}^n e^{-\lambda(j, t)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\{(1-\beta)\lambda(j_1^*, t)\}^k}{k!} e^{-(1-\beta)\lambda(j_1^*, t)} \left[V_{t+1}(f(0, j_1^*), g_s(i_2, j_2, t)) + k \right] \\
&+ \sum_{j_1=1}^{j_1^*-1} e^{-(1-\beta)\lambda(j_1^*, t)} \prod_{\substack{c=j_1+1 \\ c \neq j_1^*}}^n e^{-\lambda(c, t)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda(j_1, t)^k}{k!} e^{-\lambda(j_1, t)} \left[V_{t+1}(f(0, j_1), g_s(i_2, j_2, t)) + k \right] \\
&+ \sum_{j_1=j_1^*+1}^n \prod_{c=j_1+1}^n e^{-\lambda(c, t)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda(j_1, t)^k}{k!} e^{-\lambda(j_1, t)} \left[V_{t+1}(f(0, j_1), g_s(i_2, j_2, t)) + k \right] \\
&= e^{-(1-\beta)\lambda(j_1^*, t)} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq j_1^*}}^n e^{-\lambda(j, t)} V_{t+1}(0, 0, g_s(i_2, j_2, t)) \\
&+ \prod_{j=j_1^*+1}^n e^{-\lambda(j, t)} \left[(1 - e^{-(1-\beta)\lambda(j_1^*, t)}) V_{t+1}(f(0, j_1^*), g_s(i_2, j_2, t)) + (1-\beta)\lambda(j_1^*, t) \right] \\
&+ \sum_{j_1=1}^{j_1^*-1} e^{-(1-\beta)\lambda(j_1^*, t)} \prod_{\substack{c=j_1+1 \\ c \neq j_1^*}}^n e^{-\lambda(c, t)} \left[(1 - e^{-\lambda(j_1, t)}) V_{t+1}(f(0, j_1), g_s(i_2, j_2, t)) + \lambda(j_1, t) \right] \\
&+ \sum_{j_1=j_1^*+1}^n \prod_{c=j_1+1}^n e^{-\lambda(c, t)} \left[(1 - e^{-\lambda(j_1, t)}) V_{t+1}(f(0, j_1), g_s(i_2, j_2, t)) + \lambda(j_1, t) \right] \\
W_t(0, 0, i_2, j_2) &= e^{-(1-\beta)\lambda(j_1^*, t)} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq j_1^*}}^n e^{-\lambda(j, t)} W_{t+1}(0, 0, g_s(i_2, j_2, t))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \prod_{j=j_1^*+1}^n e^{-\lambda(j,t)} (1 - e^{-(1-\beta)\lambda(j_1^*,t)}) W_{t+1}(f(0, j_1^*), g_s(i_2, j_2, t)) \\
& + \sum_{j_1=1}^{j_1^*-1} e^{-(1-\beta)\lambda(j_1^*,t)} \prod_{\substack{c=j_1+1 \\ c \neq j_1^*}}^n e^{-\lambda(c,t)} (1 - e^{-\lambda(j_1,t)}) W_{t+1}(f(0, j_1), g_s(i_2, j_2, t)) \\
& + \sum_{j_1=j_1^*+1}^n \prod_{c=j_1+1}^n e^{-\lambda(c,t)} (1 - e^{-\lambda(j_1,t)}) W_{t+1}(f(0, j_1), g_s(i_2, j_2, t))
\end{aligned}$$

ここで $W_t(0, 0, i_2, j_2)$ の式内には、新たな乗客の加算がないことに注意する。これは、出発時にすべての期待乗車人数を加えているためである。

$j_1^* > 0$, $j_2 = 0$ のときは $t - s = 2n - i_2$ のはずで、 $i_2 = 2j_1$ か $i_2 + 1 = 2j_1$ すなわち、 j_1^* の客はすべてバス型に乗車する状態である。タクシー型を使うのは j_1^* 以外からの要求となる。よって以下の式となる。

$$\begin{aligned}
V_t(0, 0, i_2, j_2) & = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq j_1^*}}^n e^{-\lambda(j,t)} V_{t+1}(0, 0, g_s(i_2, j_2, t)) \\
& + \sum_{\substack{j_1=1 \\ j \neq j_1^*}}^n \prod_{\substack{c=j_1+1 \\ c \neq j_1^*}}^n e^{-\lambda(c,t)} \left[(1 - e^{-\lambda(j_1,t)}) V_{t+1}(f(0, j_1), g_s(i_2, j_2, t)) + \lambda(j_1, t) \right] \quad (16)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_t(0, 0, i_2, j_2) & = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq j_1^*}}^n e^{-\lambda(j,t)} W_{t+1}(0, 0, g_s(i_2, j_2, t)) \\
& + \sum_{\substack{j_1=1 \\ j \neq j_1^*}}^n \prod_{\substack{c=j_1+1 \\ c \neq j_1^*}}^n e^{-\lambda(c,t)} (1 - e^{-\lambda(j_1,t)}) W_{t+1}(f(0, j_1), g_s(i_2, j_2, t)) \quad (17)
\end{aligned}$$

ここでもバス型が帰りに乗せる客は、当初加算しているため、新たな加算はない。

8 タクシー型とバス型が両方運行中の場合

タクシー型の相乗り可能場所 j^* とする。 j^* がバス型と同じかどうかで以下の場合分けとなる。

$$\begin{aligned}
V_t(i_1, j_1, i_2, j_2) & = V_{t+1}(f(i_1, j_1), g_s(i_2, j_2, t)) + (1 - \beta)\gamma(i_1, j_1, j^*)\lambda(j^*, t) \quad (18) \\
& \quad (j^* > j_2 \text{ で, } s - t + 2n = 2j^* \text{ または } s - t + 2n + 1 = 2j^*)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_t(i_1, j_1, i_2, j_2) & = V_{t+1}(f(i_1, j_1), g_s(i_2, j_2, t)) \quad (19) \\
& \quad (j^* \leq j_2 \text{ で, } s - t + 2n = 2j^* \text{ または } s - t + 2n + 1 = 2j^*)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_t(i_1, j_1, i_2, j_2) & = V_{t+1}(f(i_1, j_1), g_s(i_2, j_2, t)) + \gamma(i_1, j_1, j^*)\lambda(j^*, t) \quad (20) \\
& \quad (\text{それ以外})
\end{aligned}$$

$$W_t(i_1, j_1, i_2, j_2) = W_{t+1}(f(i_1, j_1), g_s(i_2, j_2, t)) \quad (21)$$

乗客からの要求を受け付ける最終時刻 L を設定し、それ以後の乗客の加算をなしとして、時刻 L から時間に関して逆向きに計算することで、タクシー型、バス型の期待乗車人数を求めることができる。次の章で数値結果について述べる。

9 数値例と考察

予約受付期間を 60 期間とし、地点数や時間帯によって期待需要数を変化させ、バス型 1 台の運用 [4]、タクシー型 1 台の運用 [5]、バス型 1 台とタクシー型 1 台の同時運用、これら 3 つの場合の期待乗車人数を比較する。地点数 $n = 10, 15, 20$, 最終発車時刻 60, 最小発生率 l に対して $\lambda(i, t)$ の値は以下の式で設定した。最終発車時刻後も中心地に戻るまで運行を続け、中心地に戻った時点で計算が終了する点に注意する。 $[x]$ は x を超えない最大の整数を示す。

$$\lambda(i, t) = l + 0.1(i - 1) + 0.1\lfloor t/10 \rfloor, \quad (i \leq (n + 1)/2, t \leq 40).$$

$$\lambda(i, t) = l + 0.1(i - 1) + 0.1\lfloor (80 - t)/10 \rfloor, \quad (i \leq (n + 1)/2, 40 < t \leq 80).$$

$$\lambda(i, t) = l + 0.1(n - i) + 0.1\lfloor t/10 \rfloor, \quad (i > (n + 1)/2, t \leq 40).$$

$$\lambda(i, t) = l + 0.1(n - i) + 0.1\lfloor (80 - t)/10 \rfloor, \quad (i > (n + 1)/2, 40 < t \leq 80).$$

表 1: 最小発生率 $l = 0.1$ のときの期待乗車人数

地点数	別途運用			同時運用 (バス型 1 本)		
	タクシー型	バス型	合計	タクシー型	バス型	合計
10	31.764	12.843	44.607	31.173	12.843	44.016
15	39.653	22.635	62.288	39.643	22.635	62.278
20	50.195	35.835	86.030	50.100	35.835	85.935

表 2: 最小発生率 $l = 0.5$ のときの期待乗車人数

地点数	別途運用			同時運用 (バス型 1 本)		
	タクシー型	バス型	合計	タクシー型	バス型	合計
10	51.817	20.891	72.708	51.726	20.891	72.617
15	59.634	34.681	94.315	59.493	34.681	94.174
20	70.745	51.881	122.626	70.738	51.881	122.619

表 3: 最小発生率 $l = 1.0$ のときの期待乗車人数

地点数	別途運用			同時運用 (バス型 1 本)		
	タクシー型	バス型	合計	タクシー型	バス型	合計
10	76.891	30.934	107.825	76.501	30.934	107.435
15	85.926	49.727	135.653	85.387	49.727	135.114
20	97.039	71.927	168.966	97.039	71.927	168.966

表 4: 同時運用時のバス型の本数を変化させたときの期待乗車人数 (地点数 $n = 10$)

地点数	別途運用			同時運用 (バス型 3 本)		
	タクシー型	バス型	合計	タクシー型	バス型	合計
10	31.173	12.843	44.016	31.632	32.493	64.125
15	51.726	20.891	72.617	51.789	56.631	108.420
20	76.501	30.934	107.435	76.590	86.772	163.362

表 5: 同時運用時のバス型の本数を変化させたときの期待乗車人数 (地点数 $n = 15$)

地点数	別途運用			同時運用 (バス型 3 本)		
	タクシー型	バス型	合計	タクシー型	バス型	合計
10	39.643	22.635	62.278	39.755	53.866	93.621
15	59.493	34.681	94.174	59.704	89.997	149.701
20	85.387	49.727	135.114	85.547	135.147	220.694

これらの結果からは以下の考察ができる。

タクシー型1台の運用

比較的短い路線で、かつ需要の少ない地域での運行に適している。

バス型1台の運用

比較的長い路線で、ある程度需要の見込める地域での運行に適している。

バス型1台とタクシー型1台の同時運用

バス型の運行本数を増やすとタクシー型の乗客を取ってしまうのではないかと考えていたが、今回のように需要が全体的にある状況ではタクシー型への影響はあまりなかった。また、タクシー型1台とバス型1台の合計人数より、やや少ない人数をサービスすることがわかった。

数値のとりかたによっては、タクシー型1台とバス型1台の合計人数より、多い人数をサービスする場合（遠い地点からの要求のあとに、近い地点からの要求が頻繁にある場合など）もあり、2種類を動かすことで欠点を補いあっている場合もある。

参考文献

- [1] 辻勝久, 地方都市圏の交通とまちづくり 持続可能な社会をめざして, p185-p206, 株式会社学芸出版, 2009
- [2] 中村文彦, バスでまちづくり 都市交通の再生をめざして, 株式会社 学芸出版社, 2006.
- [3] 猪井博登ほか, 生活支援の地域公共交通 路線バス・コミュニティバス・ST サービス・デマンド型交通, 株式会社 学芸出版社, 2009.
- [4] 網田 雄気: 定時定路線型のデマンドバスにおける期待乗車人数に関する研究 鳥取大学 工学部社会開発システム工学科提出卒業論文, 2011.
- [5] 曲淵 郁弥: フルデマンドバスの運行による期待需要充足数に関する研究 鳥取大学 工学部社会開発システム工学科提出卒業論文, 2011.