

需要応答型公共交通システムの適用可能性に関する研究*

A Study on the Applicability of Demand-Responsive Transport System*

土肥 徹**,室町泰徳***,原田昇****,太田勝敏*****

By Tohru DOHI**, Yasunori MUROMACHI***, Noboru HARATA****, and Katsutoshi OHTA*****

1. はじめに

我が国では、急速な高齢化が進む中で、高齢者、障害者等のモビリティの確保が求められている。そのような中で公共交通については、従来型路線バスの衰退が続いているが、一方で、ITS 技術の発展により、新たな形態のきめ細かな公共交通サービスの提供が可能になることが期待されている。

本研究では、高齢者等に対応した新しい地域公共交通システムとして、ITS の活用による需要応答型公共交通システムの適用可能性を考察する。国内外で様々な実験が行われているが、どのようなサービスがどのような地域に適しているのかという検討は国内ではこれまで充分には行われていない。

そこで、本研究では、需要応答型公共交通システムの中から特に many-to-one 型の乗合タクシーサービスを取り上げ、需要密度（単位時間・単位面積当たりの需要発生量）別に定時定路線型のミニバスサービスとの比較・検討を行うことを目的とする。

2. 需要応答型乗合タクシーと定時定路線型バスとの比較分析

(1) アプローチ ②

バスサービスに関する費用は、バス車両を動かす

*Key Words : 公共交通計画、交通弱者対策

**学生会員，東京大学大学院工学系研究科（〒113-8656 文京区本郷 7-3-1, Tel : 03-5841-6234, Fax : 03-5841-8527）

***正会員，工博，東京大学工学部付属総合試験所

****正会員，工博，東京大学大学院新領域創成科学研究科

*****フェロー，Ph.D.，東京大学大学院工学系研究科

費用のみではない。利用者自身がバス停まで行き、バス停でバスを待ち、バスに乗車している間は時間を拘束される。以下、利用者が運賃の他に支払うこのような非金銭的な費用を利用者費用と呼ぶことにする。一方、バスを運行する費用を運行費用と呼ぶ。利用者費用は、先に述べたように、アクセス費用（停留所まで歩く費用）、待ち時間費用、乗車時間費用とに分けられる。

社会全体の費用（総費用）は運行費用と利用者費用との和で表される。本研究では、最も効率的な運行形態とするため需要密度（ Q ）別に各交通手段の乗客一人当たり総費用を最小化し、その最小化された乗客一人当たり総費用の曲線を用いて各交通手段を比較・検討する。本研究では、総費用を最小化する際に、バスについては、運行間隔、バス停間隔（バス停数）、運行上の地域の分割数（路線間隔）を、乗合タクシーについては、運行間隔、運行上の地域の分割数を変数として用いる。

(2) 対象地域とサービスについて

本研究では駅や大規模商業施設等の存在するアクティビティセンターとその周辺地域とを結ぶ many-to-one 型サービスを対象としたシミュレーションを行う。

定時定路線ミニバスは、アクティビティセンターを起点とし、一定の運行間隔で対象地域内を定められたルートで循環し、また起点に戻る。一方、需要応答型乗合タクシーは、起終点であるアクティビティセンターを一定間隔で出発し、対象地域内の乗客の戸口の前で乗客を乗降させ、またアクティビティセンターに戻る（すなわちアクセス費用は 0）。乗客

は乗車の一定時間前に電話や他の情報端末を用いてトリップを予約する。なお、この地域の住民はアクティビティセンターへの往復目的のみバスを用いているとする。

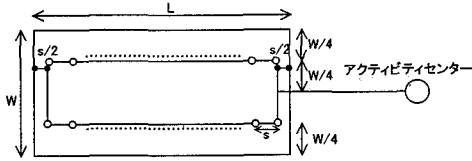


図1 仮想地域におけるバス運行の概念図

対象地域は、幅 $W=3.2\text{km}$ 、長さ $L=3.2\text{km}$ とし、アクティビティセンターから対象地域までのアクセス距離を 1.0km とした。

(3) 運行費用関数の概略

バス・タクシーの運行費用関数については、工学的な積み上げ型のアプローチを採用した。また、バス・タクシー交通と他の自動車交通との相互作用は考慮しない。

(4) 分析の仮定

分析においては、対象地区内の公共交通需要は時間的空間的に均一であり、地区内の道路ネットワークはグリッド型であると仮定した。なお、バスの利用者は自宅から最も近いバス停を利用するものとした。

(5) 運行サービスモデル

(a) 領域の分割

対象地域を1つの領域としてではなく複数の部分に区切って運行した方が総費用が小さくなる場合がある。バスについては、分割の方向は図1のLに平行な方向に分割するものとし、分割された部分地域毎に同様の循環型バス路線を運行するものとした。

分割数は、現実の道路ネットワークを考慮すれば上限があるはずであり、分割した領域の幅が 0.5km を下回らないことを条件とした。

分割に伴い路線長が多少伸びることになる。分割に伴う路線当たりの長さの伸びを l_{plus} とすると、 W を地域の幅として

$$l_{\text{plus}} = \begin{cases} W/4 & (n : \text{奇数}) \\ W/4 * (1 - 1/n^2) & (n : \text{偶数}) \end{cases} \quad (1)$$

となる。ここで n は分割後の路線数(地域のパーテ

ィション数)であり、非分割時に $n=1$ となる。

一方、タクシーについては、図1のLに平行な方向に n 、垂直な方向に m の地域に等間隔に分割し、合わせて $n*m$ の領域に分割した。

(b) 運行間隔 h

運行間隔は、①1循環の延べ利用者数が、車両の乗車定員を超えない ②政策的に決められた最大運行間隔 h_{max} (60分と設定)を超えない という2つの制約条件を満たすこととし、計算上は30秒単位で変化させて最適化した。

(c) バス停間隔 s (バスについてのみ)

最適化する変数である。新交通システムや地下鉄の駅間隔を踏まえ、最大値を 0.8km とした。バス停間隔が長い時はバス停数が整数となるように定め、バス停間隔が短い時は 0.01km 単位で変化させた。

(境界はバス停数が10)

(d) バス停の停車数 (バスについてのみ)

あるバス停で乗降する乗客数がポアソン分布に従っていると仮定する。乗客数が x である確率を $P(x)$ とすると、乗客が少なくとも一人乗降する確率は、 $1 - P(0)$ である。

$$P(0) = \exp(-\lambda) \quad (2)$$

$$\lambda = q * l_a * w_a * h / 60 / n_{\text{stop}} \quad (3)$$

(λ :乗客数の期待値、 q :需要密度、 l_a :分割後の領域の長さ、 w_a :分割後の領域の幅、 h :運行間隔、 n_{stop} :総バス停数)

(2),(3)の関係から、平均停車バス停数が $n_{\text{stop}} * (1 - \exp(-\lambda))$ として求められる。

(e) 停車による損失時間

損失時間は停車時間に加減速に伴う追加時間の和である。1 停車地点当たりの停車時間については鬼木²⁾による乗客一人の平均乗車時間および降車時間を平均した値に、停車地点当たりの平均乗降客数をかけて求めた。また、停車地点に停車する際の加減速に伴う追加時間は、岡部ら⁴⁾による加速度、減速度を用いて求めた。加減速、停車時間以外は平均的な速度 v で運行していると仮定すると、一循環に要

表1 バスの1人当たり平均乗降時間³⁾

	交通困難者	健常者
乗車時間(秒)	2.05	1.48
降車時間(秒)	2.39	1.61

する所要時間 t_r は次式で求められる。

$$t_r = l_r/v + n_{stop} * (stoptime + (1/2/\alpha + 1/2/\beta) * v) \quad (4)$$

(l_r : 路線長、 n_{stop} : 停車停留所数、 $stoptime$: 停車時間、 α : 加速時の加速度、 β : 減速時の加速度の絶対値)

なお、速度 v は 16km/h と設定し、

$$\alpha = 2.16 \text{ km/min}^2, \beta = 4.32 \text{ km/min}^2 \text{ とした。}$$

(f) 乗合タクシーの運行距離

巡回セールスマン問題の研究から、各点がランダムかつ独立に分布しているとき、次式が成立する。

$$D = \phi * \sqrt{N * A} \quad (5)$$

D : 巡回距離 ϕ : 定数 N : 巡回地点数 A : エリア面積

既存研究⁵⁾によると、街路がグリッド状の場合、準最適時の値として定数 $\phi = 1.165$ となる。

(g) 必要車両数

運行に必要な車両数は、一循環に必要な時間 t_{cmin} (運行調整時間を含む。) と運行間隔 h を用いて

$$nv = \text{roundup}(t_{cmin}/h) \quad (6)$$

(但し、 $\text{roundup}(x)$ は x の小数点以下を切り上げた整数値を示す。)

により求められる。 t_{cmin} は 1 循環に要する時間 t_r と最低調整時間 t_{amin} (バス 5 分、タクシー 15 分と設定) の和である。

(6) 運行費用

運行モデルをもとに運行費用を計算する。運行費用について用いた式は表 2 の通りである (バスについてののみ示す。)

(7) 利用者費用

(a) アクセス費用

平均アクセス距離 $accessdist$ は、分割後の地域(パーティション)幅を wa として

$$accessdist = s/4 + wa/8 \quad (7)$$

となる。アクセス費用は歩行速度 v_{walk} 、電車乗車 1 分間の時間価値を vot 、徒歩時間 1 分の等価時間係数を ra として、

$$accesscost = accessdist / v_{walk} * vot * ra \quad (8)$$

となる。

表2 運行費用に関する説明

項目	計算式	備考	根拠
走行キロ	$sr = f * l_r$	f: 日運行回数、 l_r : 路線長	
回送キロ	$sn = asn * 2 * l_r$ nv :	nv : 車両数、係数 $asn=0.5$	
走行キロ	$st = sr + sn$		
必要運転手数	$ndw = s/v$ $handtime$:	$handtime$: 運転手が1日にバスを走行させる時間(300分)	6)
在籍運転手数	$nd = ndw * (1 + rd1) / rd2$	$rd1$: 予備率(0.01)、 $rd2$: 出勤率(0.75)	6), 7)
技工人数	$nr = ar * nv$	nv : 車両数 ar : 係数(0.1)	8)
一般職員人数	$ng = ag * nv$	nv : 車両数 ag : 係数(0.25)	8)
運送人件費	$cp = wd * nd + wr * nr$	wd : 運転手の人件費(3,500)、 wr : 技工人件費(6,800)	9)
減価償却費	$cvd = pv * nv / yv$ $cf = s * 365 * pf / rfc$	pv : 車両価格(13,000)、 yv : 耐用年数(10) pf : 燃料単価(0.063)、 rfc : 燃料消費率(4.2)	車両メーカーホームページ
一般管理費	$ca = ng * (wg + oapp * ro / 3.3 * 12)$	wg : 一般職員の人件費(6,400)、 $oapp$: 一人当たりオフィス面積(14)、 ro : 坪月オフィス賃料(10)	9)
車両修繕費	$cvr = avr * nv$	avr : 係数(817.8)	7)
車両関係税、保険	$tax = 39.2 + 25.5 + 51.2 + pv * 0.03 / yv$	自動車取得税、自動車税、重量税、自賠責。自動車取得税は耐用年数で均等配分。	
その他費用	$co = ao * nd + parkingarea * rl * nv + tax * nv$	ao : 制服等の費用の係数(130)、 $parkingarea$: 車庫必要面積(86)、 rl : 地代(12)	制服等は11)、車庫はバスの水平投影面積から推定
資本費用	$cc = (pv * nv + aoc * (cp + cf + ca + cvr + co)) * r$	aoc : 運転資本率(0.04) r : 利率(0.06)	12)
総運行費用	$c = cp + cvd + cf + ca + cvr + co + cc$		

※長さ、時間、貨幣、面積の単位はそれぞれ断りがない限りkm、分、千円、㎡
※古いデータはデフレーターにより現在の価格に換算。

(b) 待ち時間費用

平均待ち時間は運行間隔の半分とし、時間価値と等価時間係数をかけて求めた。

(c) 乗車時間費用

平均乗車時間を用いて同様に求めた。

(a)~(c)の等価時間係数は新田¹³⁾による高齢者についての電車着席を基準とした値を用いた(表3)。

表3 高齢者の等価時間係数¹³⁾

電車着席 1 分の時間価値(円)	3.95
徒歩の等価時間係数	3.73
バス着席 1 分の等価時間係数	1.44
待ち時間の等価時間係数	2.62

(8) 最適化

バス、タクシーの乗客一人当たり総費用 C_b, C_t を次のように最適化する。(制約条件を略す。)

$$C_b^*(Q) = \min_{h,s,n} C_b(Q, h, s, n) \quad (9)$$

$$C_t^*(Q) = \min_{h,n,m} C_t(Q, h, n, m)$$

3. 分析結果

一人当たり総費用 $C_b^*(Q), C_t^*(Q)$ に関する比較結

果を図2に示す。両サービスとも、需要密度が高くなると、乗客当たりの総費用は小さくなっていく。これは、密度が高くなるにつれて、運行頻度が高く、かつ、路線網の密度の高い運行が可能になるからである。また、需要密度が小さい地域では、需要応答型乗合タクシーが有利、大きい地域では、従来型バスサービスが有利という結果が得られたが、その差はあまり大きくはない。境界は需要密度が2.5人/時・km²のところとなった。なお、一人当たり総費用のうち、運行費用については、一例として需要密度が10人/時・km²のとき、需要応答型が307円、定時定路線型が156円と倍程度の差が生じた。

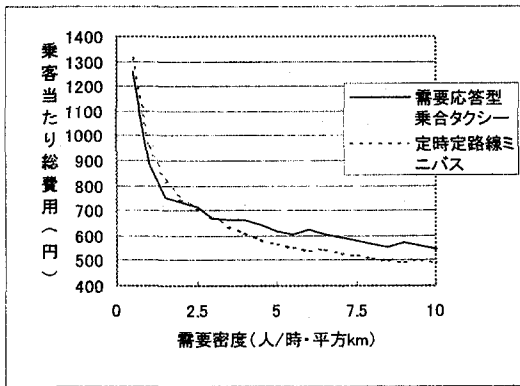


図2 2交通手段の比較

需要密度の人口密度への換算を試みる。パーソナルトリップ調査の結果を参考にバス・乗合タクシーサービスの分担率を4%、トリップ生成原単位を2.65トリップ/日、全日トリップに占める運行時間帯1時間のトリップの比率7%として計算すると、需要密度2.5人/時・km²は3.7人/haに相当する。この計算はごく大雑把なものである。しかし、パラメータの変動を考慮しても、需要応答型タクシーが有利な地域は、低密度な地域であることには変りがない。高密度な地域では、真にドア・ツー・ドアサービスを必要とする人への対応を除いては、コミュニティバスなどの定時定路線型のバスサービスを充実させていく必要がある。

4. まとめ

本研究では、仮想的地域において、需要応答型乗合タクシーと定時定路線型ミニバスという2つの公

共交通手段を、総費用の点から比較し、需要応答型公共交通システムの可能性について検討した。

今回は仮想地域での検討にとどまったが、現実の地域での実際の道路ネットワークを用いた分析を行うことが今後の課題として残されている。また、many-to-many型サービス、フレックスルート型サービスなど他の需要応答型公共交通サービスについての実際の地域の人口分布特性を考慮した検討や、新たな公共交通サービスに関する地域住民の受容可能性についてのヒアリングなどを通じた検討も必要である。

参考文献

- 1) 秋山哲男, 中村文彦編: バスはよみがえる, 日本評論社, pp.75-90, 2000
- 2) ケネス・A・スモール: 都市交通の経済分析, 勁草書房, pp.55-71, 119-122, 1999
- 3) 鬼木光一: バス乗降特性からみた交通困難者対策についての研究, pp.30-52, 東京大学工学部都市工学科卒業論文, 1996
- 4) 岡部篤行, 鈴木敦夫: シリーズ[現代人の数理]3 最適配置の数理, 朝倉書店, pp.142-162, 1992
- 5) Daganzo, C.F: The Length of Tours in Zones of Different Shapes, Transportation Research, Vol.18B(2), pp.135-145, 1984
- 6) 渡辺千賀絵: 公営バス事業におけるバス運行回数と運転手数の制約関係, 土木計画学研究・講演集, No.12, pp.111-117, 1989
- 7) 藤田昌弘, 稲村肇, 須田熙: 採算性を考慮したバス路線の決定, 土木計画学研究・講演集, No.8, pp.177-184, 1986
- 8) 田中耕造: バス輸送計画策定上考慮すべき問題点 一都市バスの経営収支に関する一般的理論を中心として一, 運輸と経済, 第42巻, 第4号, pp.47-58, 1982
- 9) (財)運輸経済センター: 地方バス活性化方策に関する調査報告書, pp.63-64, 127-130, 1995
- 10) 町田市都市計画課資料, 1998
- 11) 青木定雄: 京都観光業界の発展を目指して, pp.38-40, 1999
- 12) (社)くらしのリサーチセンター: 公共料金読本 一改訂版一, 1994
- 13) 新田保次, 上田正, 森康男: 高齢者の交通形態別等価時間係数と時間価値, 土木計画学研究・講演集, No.16(2), pp.191-194, 1993