平成 28 年度卒業研究論文

東南アジアにおける
乗合タクシーの意思決定モデル

法政大学　理工学部　経営システム工学科

経営数理工学研究室

13X4018　大芦　拓未

13X4130　深田　雅也

指導教員　　五島　洋行　教授

学科名	経営システム工	学籍番号	13X4018 13X4130
申請者氏名		大芦　拓未 深田　雅也	
指導教員氏名		五島　洋行	

論文要旨

論文題目	東南アジアにおける 乗合タクシーの意思決定モデル

本研究では，異なる二つの観点から乗合タクシーの意思決定モデルを提案する．一つは乗合タクシーの乗客を二組と仮定したときの，一組目の乗客の残り走行距離に注目するケース，もう一方は後に降車する乗客の総走行距離に注目するケースである．この二つのモデルより，後から乗車する乗客の目的地による運転手の意思決定を定めることができる．本提案手法により，これまで運転手の“経験と勘”によって決められていた走行経路を一意的に決定し，東南アジアの乗合タクシーの交通システム効率化に貢献できると考える．

目次

1　はじめに

1.1　研究背景

1990 年代，東南アジアは，先進国である日本や欧米諸国などの大企業の進出により，本格的な工業化が進み，高度経済成長を続けてきた．それ以降，アジア通貨危機により一時停滞したものの，輸出の拡大により急速な回復を示し，現在では，世界的に人気の高い観光地としても活躍しながら成長を続けている．しかしながら，都市交通に関しては，大都市が急成長しているのに対し，郊外は路面電車や地下鉄等の交通インフラがいまだ十分に整備されていないことが問題となっている[1]．そのような地域での交通手段は，主に自家用車やバス，タクシー等が挙げられるが，特に深く根付いているのが三輪自動車タクシー，いわゆる乗合タクシーである．乗物大国のタイで言えば，サムローまたはトゥクトゥクと呼ばれる三輪自動車タクシーが例として挙げられる．

三輪自動車タクシーは, 国の文化として古くから運行されてきた伝統的な乗り物であり，多くの地元民や観光客の足として親しまれている．しかしその一方で，その伝統的な乗合タクシーの運行システムの効率の悪さが渋滞や金銭トラブルなどの原因となることがある．

発展途上国である東南アジア各国において, 大都市同様の交通インフラを郊外に整備することは難しい．そのため，既に地域に浸透している乗合タクシーの運行システムを改善することが, 都市交通全体の利便性を底上げする妥当な解決策であると考えられる．

1.2　研究目的

乗合タクシーの運行形態は, 従来日本で運行されているタクシーの運行形態とは異なる性質を持つ．一般的なタクシーは，乗客を乗せた地点から，寄り道をせずに最短経路でその客の目的地まで向かう．それに対し，乗合タクシーは道中に新たな客を乗せ，異なる目的地がさらに追加されることがある．

運転手は，新たな客を乗せる度，先に乗せた客と後に乗せた客のどちらを優先して降ろすかを, 乗客それぞれの目的地の位置などを考慮し決める. 新たな客が発生する都度, 最適な経路選択ができればよいが，東南アジアの乗合タクシーにおいて，明確な判断基準は存在せず，どちらを優先するかは運転手の経験と勘に依存して判断されている．そこで本研究では，乗合タクシーの運転手の経路選択時に用いる“経験と勘”をモデル化することで導かれる，最適なルート選択の手法を提案する．

2　関連知識

2.1　公共交通機関の分類

本章では，本研究のターゲットとなる交通機関をより明確にするため，交通機関の分類と交通機関内でのそれぞれの位置づけを説明する．

交通機関は主に私的交通と公共交通の二つに分類され，公共交通はさらに，従来型公共交通とパラトランジットの二つに分類される[2]．従来型公共交通は，先進国で一般的に見られるバスや鉄道などを指す．パラトランジットとは，公共交通と私的交通との中間的な特性を持つ多種多様な交通機関である．パラトランジットは先進国にも一部導入されているが，主に発展途上国を中心に運行されており，各地域で異なる特性を持つ．そんなパラトランジットについて，それぞれが持つ特性に基づいて内部を分類する研究が広く行われている．

外尾（1993）では，車両の特徴，運行の特徴，運営主体と営業ライセンス，営業地域及びルートの規制に基づいて分類を行っている．太田（1982，1988）では，車両の特徴，運行の特徴や料金決定法，料金水準に基づき，また，Cervero（2000，2007)では車両の特徴，運行の特徴，営業地域に基づいて分類を行っている．ここで，車両の特徴は，エンジンの大きさや車両の大きさ，乗車定員によって，物理的に特徴付けられる．外尾（1993）はそれに基づき，Motorized-Paratransit を個別型，相乗り型，乗合型の三つに分けている．また，乗合定員は個別型で 5 人以下，相乗りは 6-10 人程度，乗合型は 10 人以上としている．例として，個別型であれば，タイの Tuk-tuk やバングラデシュの Auto rickshaw，先進国で運行されているタクシーなどが挙げられる．また，乗合型であれば，フィリピンの jeepney やインドネシアの Oplet などが挙げられる．

運行の特徴は，路線，停車地，ダイヤの組み合わせによる柔軟性の違いで特徴付けられる．運行の特徴と車両の特徴にはある程度対応関係がある．例えば，個別型のタクシーの運行形態は路線，停車地，ダイヤも自由である．車両の特徴と路線・停車地については，個別型―ドアツードア，相乗り型―路線固定・停車地自由という関係が成り立っている．ただし，乗合型やダイヤについての対応関係に特に規則はない．

以上をもとに，交通機関の分類を図示したのが図 1 である．ここで，相乗り型や乗合型パラトランジットを中間的公共交通(IPT, Intermediate Public Transport)，個別型のパラトランジットを個別型公共交通（Individual Public Transport）と呼ぶことにする．本研究では，図 1 の点線部分の交通機関をモデル化の対象とし，以降 “乗合タクシー” と呼ぶ．

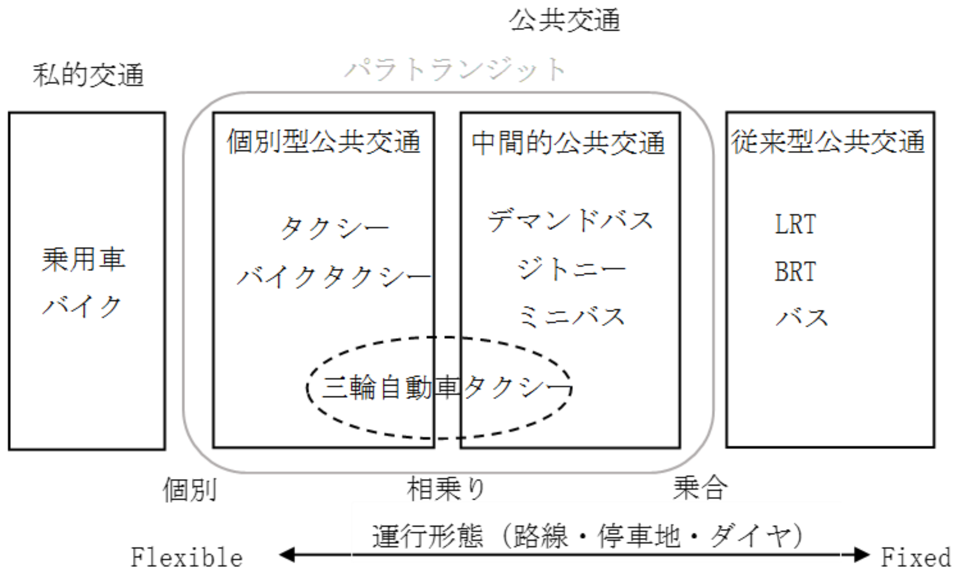

図 1. 交通機関の分類表([2]をもとに著者作成)

2.2 乗合タクシーの運行システム

2.2.1 運行形態

乗合タクシーの乗車方法は一般的なタクシーと同様であり，停車もしくは走行している車両を捕まえて乗車依頼することで成立する．ただし，乗車依頼をした時点で，既に乗客が存在する場合，目的地がその乗客と同方向であれば乗車を受け入れられ，異なる方向であれば乗車を拒否されることがある．ここで，乗車を受け入れるか拒否するかの運転手の判断基準は明確でない．

二組目の乗車が決定したときの運転手の経路選択は，運転手が日々の運行によって形成した不確実な意思決定基準から判断される．乗客の降車順はそれに従って決定する．乗合タクシーは基本的に，それぞれの目的地までは最短経路を通って向かう．

2.2.2 運賃システム

乗合タクシーの運賃システムには，乗車前に料金を交渉する料金交渉制と，走行距離で料金が決まる距離メータ制がある．料金交渉制タクシーの運賃は，30 バーツ程度の最低料金を基準に，距離と混雑度に応じて交渉で決められる[3]. 距離メータ制タクシーの運賃は，2007 年 8 月時点で，初乗り 2km までが 35 バーツ，以降 1km 毎に約 2 バーツ

が加算される[4]．バンコクでは 1992 年に距離メータ制タクシーが導入され，現在では，運行しているタクシーの大半が距離メータ制である．チェンマイでも 2003 年に距離メータ制タクシーの運行が始まったが，いまだ料金交渉制タクシーが多く残っている．

土地勘がなく，現地で使われている言語を解さない外国人観光客にとって，現地の路線はわかりにくい上，多くの観光スポットは駅から遠く離れているため，路面電車のみの利用で目的地に自力で辿り着くことは困難である．したがって，観光客は妥当な移動手段として，個別チャーター式の交通機関やタクシーに頼らざるを得なくなる．ゆえに，外国人観光客は地元客よりも割高の運賃を見込めることから，乗合タクシーと料金交渉する際，運転手から割高な料金を提示されることがある．料金交渉制は，距離メータ制に比べて料金設定基準が不明瞭であることから，そのような金銭トラブルを引き起こす原因となっている．よって料金交渉制には，より的確な料金設定を可能とする指標が必要であると考えられる．

3　提案手法

2.2.1 節で述べたとおり，乗合タクシーには，異なる目的地を持つ乗客が複数乗車する．それぞれの乗客の目的地によって降車させる順番や乗車受入の可否は異なり，乗客の数が増えると，それに伴って意思決定の選択肢が増える．このような複数の乗客を扱う乗合タクシーの意思決定のモデル化を試みると，様々な場合分けが必要となり複雑になってしまう．

本研究では，それらの意思決定の第一歩となるようなシンプルなモデル化を行う．よって，乗合タクシーの最大乗車組数を二組と仮定し，運転手の乗客受入及び経路選択の意思決定を定式化する．また，乗合タクシーが二組の乗客を乗車させた場合，二組目を降車させるまでは新たな乗客を乗せることはできないものとする．

乗客の受入領域とは，二組目の乗客の目的地によって降車させる順番の決定や乗車拒否の意思決定を行う領域の指標である．乗合タクシーが通る経路及び目的地を(x, y)平面上で表現し，各点まで直線上を移動するものとする．また，一組目の乗客の出発地から目的地までの距離を 1 とおく．

3.1　残りの走行距離に注目した手法

本提案手法では，二組目の乗客が発生したときに，乗合タクシーがそれまで走ってきた距離と一組目の乗客の目的地までの残り距離に注目し，運転手の意思決定をモデル化する．本ケースにおいては，二組目の乗客が発生した地点をtと表す．

3.1.1　制約と定式化

前述のとおり，二組目の乗客を先に降車させるとき，乗合タクシーは一組目の乗客の目的地までの最短経路から外れ，寄り道をする．一組目の乗客にとって，出発地付近や目的地付近で遠くの目的地を持つ乗客を乗車させ，寄り道をする経路を選択することは不利益になる．また，徐々に一組目の目的地に近づいているとき，遠くの目的地を持つ乗客を乗車させ，寄り道を許すことは望ましくない．以上の 2 点をまとめると乗車を許せる二組目の乗客の目的地までの距離の上限$\square_1(\square)$は下記のようになる．

・出発地及び目的地付近では 0 となる

・出発点から$t = 0.5$にかけて徐々に広がり，以降目的地にかけて乗車許容範囲が狭まっていく$(0 \le t \le 1)$

これらを満たす関数を考察した結果，$t = 0$では解が存在しないが，それ以外の地点で上記の条件を満たすため，定数を用いて一般化させた式(1)が妥当なものであると考える．$a = 1$のとき，式(1)の関数のグラフは，図 2 となる．

$$R_1(t) = -at\log t\,, \qquad\qquad (0 < t \leq 1). \tag{1}$$

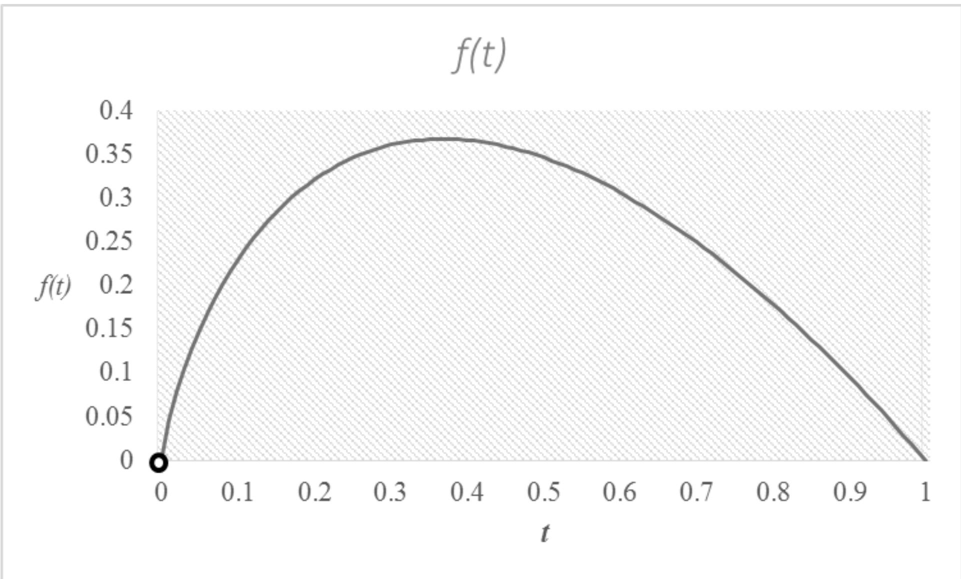

図 2. □ = □のときの □(□) = −□□□□□ □(□ < □ ≤ □)のグラフ

二組目の乗客が発生した場所からその目的地までの距離$R_1(t)$は，中心を乗客の発生場所とする角度$\theta = \pi/2$のときのみの関数であり，その挙動は角度θに依存しない．しかし，現実に起こる一般的なタクシーの目的地が一方向に決定していることはなく，式(1)のような関数は現実的でないと言える．したがって, 式(1)に角度$\theta(0 < \theta \leq \pi)$を含ませ，上記の条件を満たす関数に設定する必要がある．

角度θに関して，θが小さくなるにつれ，二組目の乗客の目的地が一組目の乗客の目的地と同方向に存在することを意味するため，$R_1(t)$をより長く設定する．それに対し，角度θが大きくなるにつれ，一組目の乗客の目的地と別方向に進むことになるため，より短く設定する必要がある．そこで我々は式(1)に式(2)を掛け合わせることで，上記の制約を満たす関数式(3)を設定する．

$$f(\theta) = -\log\left(\frac{\theta}{\pi}\right), \qquad (0 < \theta \leq \pi). \tag{2}$$

$$R_2(t,\theta) = b_2 t \log t \log\left(\frac{\theta}{\pi}\right), \qquad (0 < t \leq 1, 0 < \theta \leq \pi). \tag{3}$$

式(3)は$t = 1, \theta = 0$のとき，$R_2(t,\theta) = +\infty$となるため，一組目の乗客を先に降車させるケースの意思決定領域と考える．

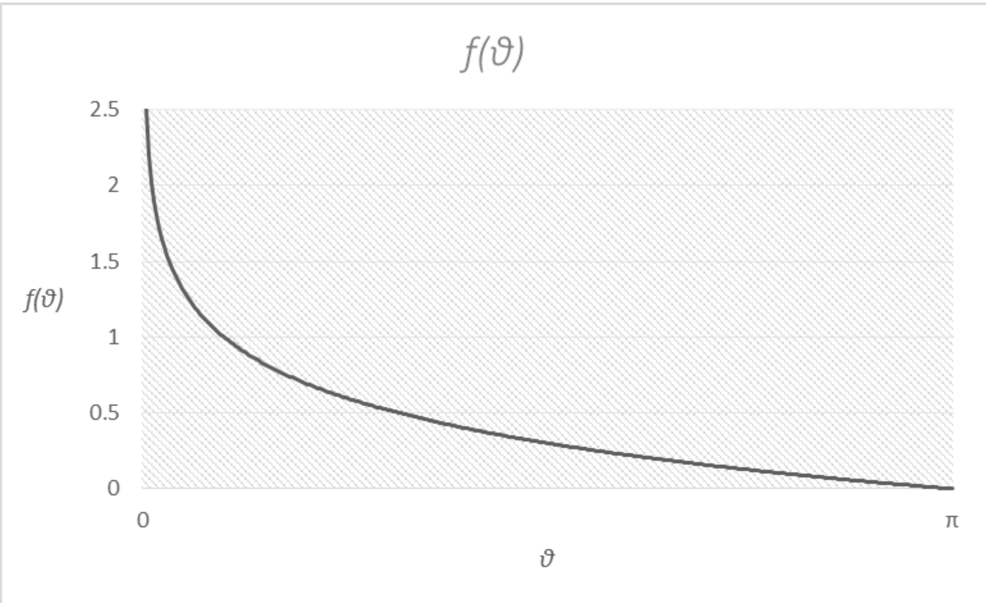

図 3. $\mathbf{f(\boldsymbol{\theta}) = -\log\left(\frac{\boldsymbol{\theta}}{\boldsymbol{\pi}}\right)(0 \leq \boldsymbol{\theta} \leq \boldsymbol{\pi})}$のグラフ

次に，二組目の乗客を先に降車させるケースを考える．式(3)と同様に，θに関する関数を式(1)に導入する．導入する関数については，角度$\theta = \pi$に近づけば近づくほど 0 に近づき，角度$\theta = 0$に近づけば近づくほど，一組目の乗客の降車を優先させるため，1 に近づくという制約を満たすものが望ましい．そのような関数を考察した結果，我々は式(4)の関数を式(1)に掛け合わせることで，式(5)を設定する．次節で式(3)と式(5)の定数の決定を行う．

$$f(\theta) = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \qquad (0 < \theta \leq \pi). \tag{4}$$

$$R_3(t,\theta) = -b_3 t \log t \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \qquad (0 < t \leq 1, 0 < \theta \leq \pi). \tag{5}$$

3.1.2　定数の決定

本節では，前節で取り上げた式(3)と式(5)における定数部分b_2, b_3の決定を行う．本研究では，一組目の乗客を先に降車させた場合，二組目の乗客を降車させるまで新たな乗客を乗車させることはできないと仮定している．そのため，二組目の乗客を乗車させて延々と走行するよりもある程度の場所で降車させた方が利益は大きくなる．本提案手法では，走行距離と残り走行距離に注目しているため，式(3)では，□ = 1/□, □ = □/2のとき，残りの距離分である$R_2(t,\theta) = (1 - 1/e)$と設定する．これらの値を式(3)に代入し解くと，$b_2 = 2.48$と決定することができる．式(5)では，$t = 0.9, \theta = 0$のとき，$R_3(t,\theta) = 0.1$と設定する．これは，二組目の乗客を先に降車させるため，目的地が同方向である際に，一組目の乗客の目的地よりも遠い目的地を許容するのは望ましくないためである．これらの値を式(5)に代入し解くと，$b_3 = 1.05$と決定することができる．求めた定数を実際に代入してグラフ化すると図 4 となる．

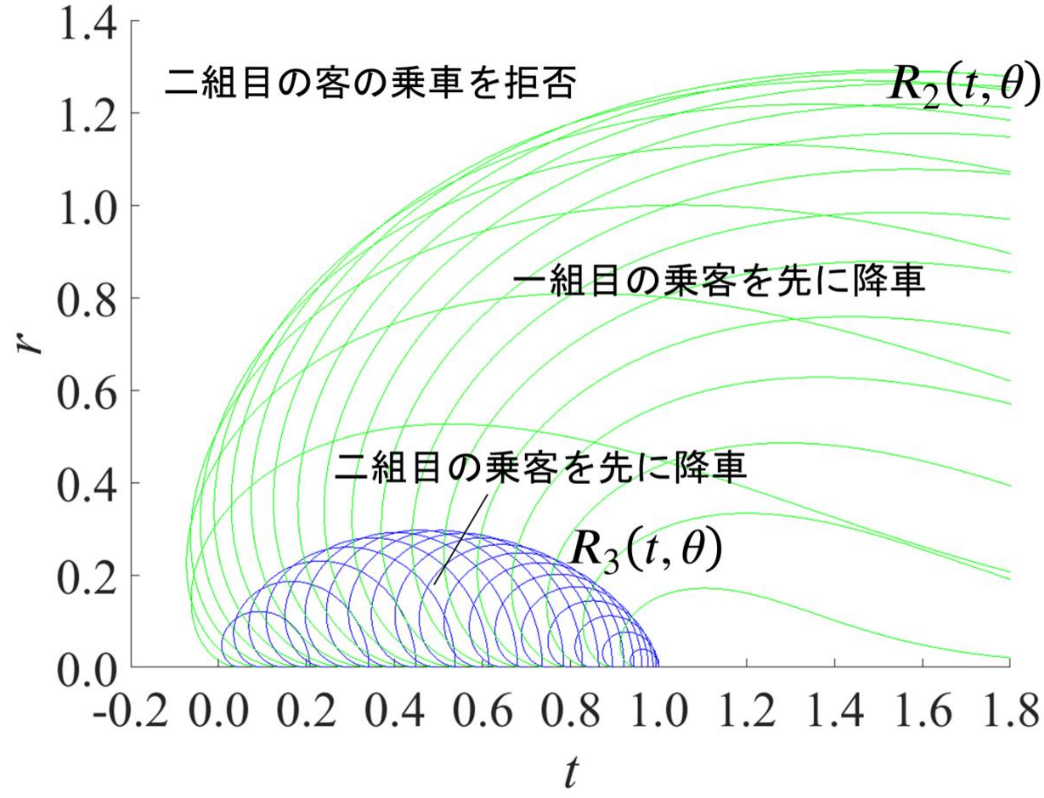

図 4. $\boldsymbol{b_2 = 2.48, b_3 = 1.05}$のときの式(3)と式(5)のグラフ

3.2　後に降車する乗客の総走行距離に注目した手法

本提案手法では，二組目の乗客が発生したときに，後に降車する乗客の総走行距離に注目し，運転手の意思決定をモデル化する．本ケースにおいては，二組目の乗客が発生した地点をxと表す.

3.2.1　二組目の乗客を優先する場合

本節では，二組目の乗客を先に降車させ，その後一組目の乗客の目的地に向かう場合の乗客の受入領域を定式化する．本提案手法では，一組目の乗客の出発点から二組目の乗客が発生する点までの距離をxとおく. さらに, 二組目の乗客の目的地までの距離をy_1とおくと, 二組目の乗客を先に降車させる経路は以下の図 5 の黒い線で表すことができる．

本研究は, 新たな乗客が発生したときに考えられる乗合タクシーの総走行距離に注目する．出発点から，二組目の目的地を経由して一組目の目的地まで向かうときの総走行距離が，一組目の目的地まで最短経路で向かうときの総走行距離のr_1倍以下であるとき，

二組目の乗客が先に降車させられるとする．また，一組目の目的地に近づけば近づくほど，二組目の乗客が先に降車する領域を小さくした方がより現実的なモデルに近いという考えから，一組目の乗客の目的地までの最短距離にかける係数を工夫した結果，一組目の乗客の総走行距離のr_1倍までを受け入れる式は式(6)と表現でき，整理すると式(7)と定式化できる．

$$x + y_1 + \sqrt{y_1^2 + (1-x)^2} \leq (1-r_1)x + r_1, \quad (0 \leq x \leq 1, 0 < y_1, 1 < r_1). \tag{6}$$

$$y_1 \leq \frac{(1-x)(r_1^2-1)}{2r_1}, \quad (0 \leq x \leq 1, 0 < y_1, 1 < r_1). \tag{7}$$

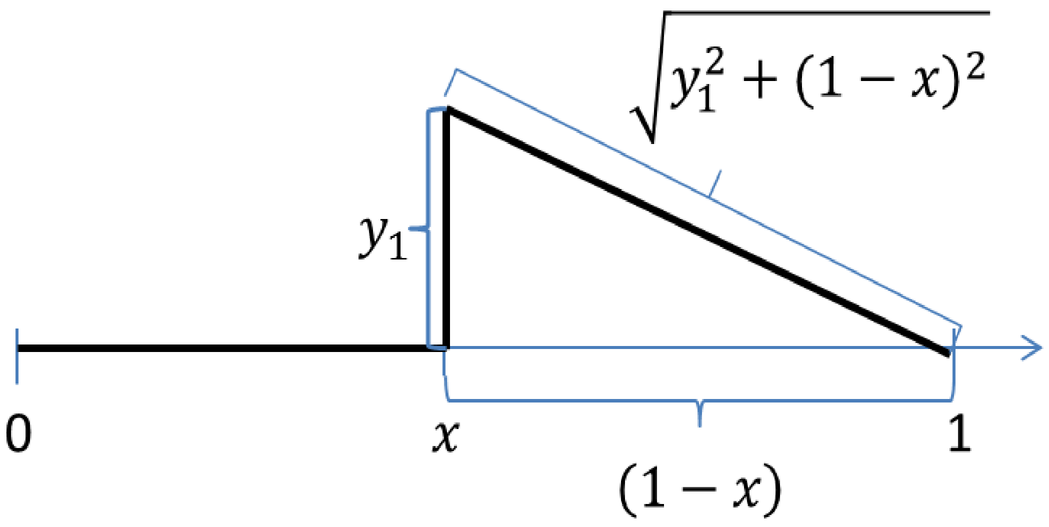

図 5．先に二番目の乗客を降車させる際の乗合タクシーの経路

3.2.2　一組目の乗客を優先する場合

前節では，一組目の乗客を後に降車させるケースの定式化を行ったが，本節では一組目の乗客を先に降車させる場合の乗車受入の意思決定を行う．本節のケースでのタクシーの経路は図 6 の黒い線である．このケースでは先に降車する乗客が一組目の乗客であるため，二組目の乗客の総走行距離が，目的地までの最短距離y_2のr_2倍以下を受け入れるとする式は式(8)と表現することができ，整理すると式(9)と定式化することができる．

$$(1-x)+\sqrt{y_2^2+(1-x)^2} \le r_2 y_2, \qquad (0 \le x \le 1, y_1 < y_2, 1 < r_2). \tag{8}$$

$$y_2 \le \frac{2r_2(x-1)}{(1-r_2^2)}, \qquad (0 \le x \le 1, y_1 < y_2, 1 < r_2). \tag{9}$$

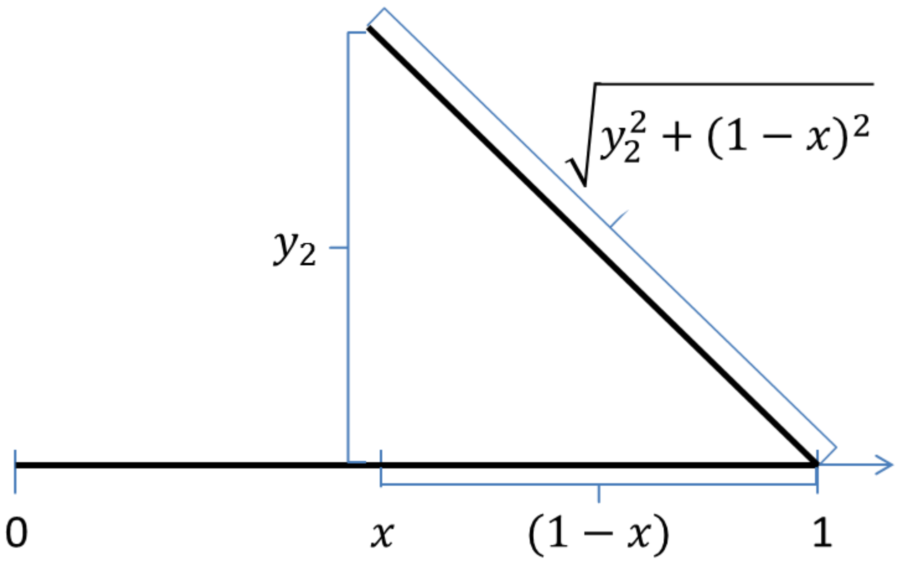

図 6.　一組目の乗客を先に降車させる際の乗合タクシーの経路

3.2.3　二組目の乗客の目的地による運転手の意思決定

上記の式(7)と式(9)から，乗合タクシーの運転手は乗客の降車順を決定することができる．本研究では，乗合タクシーが二組の乗客を乗車させたとき，両方の乗客を降車させるまでは新たな乗客を乗車させることができないと仮定している．そのため，乗客を乗せたまま二組目の乗客を探すよりも, すべての乗客を降車させて二組の乗客を探す方が，利益が大きくなる．よって，式(4)から導き出されるy_2よりも遠い目的地を持つ二組目の乗客については，その乗車を拒否する．そうすることで，本研究の仮定下における全ての経路選択及び意思決定を網羅できる．

3.2.4　出発地及び目的地付近での受入領域

上記の三つの領域によって, 運転手の経路選択及び意思決定の境界を定めることができる．しかし，その領域の関数は単調減少で，一組目の乗客の出発地付近では遠くの目的地を持つ乗客の乗車を許容してしまう．そのような領域は，今回の仮定化のすべての意思決定において乗客に不利益をもたらしてしまう．そこで，y_1, y_2に 3.1 節で用いた式(10)から導かれるzを用いて y_1', y_2'を定めることで，一組目の乗客の出発地及び目的地付近で別方向の遠い目的地を持つ乗客を乗車させないような意思決定領域にする．式(10)において，$x = 0$ではzを定義することができないが，出発地では別の方向へ向かう乗客を乗車させることは望ましくないという考えから，$x = 0$のとき$z = 0$とする．

$$z = -x \log x \,, \qquad\qquad (0 < x \leq 1). \tag{10}$$

$$y_1' = \frac{y_1 + z}{2} \,, \qquad y_2' = \frac{y_2 + z}{2} \,, \qquad (0 \leq x \leq 1, y_1 < y_2, y_1' < y_2'). \tag{11}$$

3.2.5　r_1とr_2の設定

運転手の意思決定の境目となる二組目の乗客の目的地までの距離の上限y_1, y_2は，後に降車する乗客の目的地までの最短距離の定数倍r_1, r_2によって決定される. 本研究において，二組目の乗客が発生し，そちらを先に降車させる場合，一組目の乗客は先に契約を行い乗車していたにも関わらず, 後に契約をした乗客のために総走行距離が延長されてしまう．よって本研究では，二組目の乗客の目的地へ先に向かうことに対してペナルティを設ける必要があると考え，$r_1 < r_2$と設定する．

本研究では，走行距離にのみ注目しているためr_1とr_2がこのような設定になるが，すべてのケースにおいて$r_1 < r_2$となるわけではない．例えば，二組目の乗客に対して料金を多めに請求することで，$r_1 = r_2$や$r_1 \geq r_2$とすることもできる．

以下で，$r_1 = 1.2, r_2 = 1.5$と$r_1 = 1.5, r_2 = 1.8$の 2 ケースについて計算を行い，二組の乗客の降車順と乗車受入の可否の境界の変化の考察を行う．それぞれの意思決定領域は，図 7 と図 8 に表す．

それぞれの数字が持つ意味は$r_1 = 1.2, r_2 = 1.5$の場合，r_1は一組目の乗客が後に降車する際にその総走行距離が元々の目的地までの最短距離の 1.2 倍までとなるような二組目の乗客の目的地の上限を定めることを意味し，r_2は，二組目の乗客が後に降車する際にその総走行距離が 1.5 倍までとなるように，二組目の乗客の目的地の上限を定めることを意味する．y'は二組目の乗客の目的地までの距離である．

図 7 と図 8 により，r_1を大きくすると二組目の乗客を優先する範囲が広がり，r_2を大きくすると一組目の乗客を優先する範囲が狭まる．

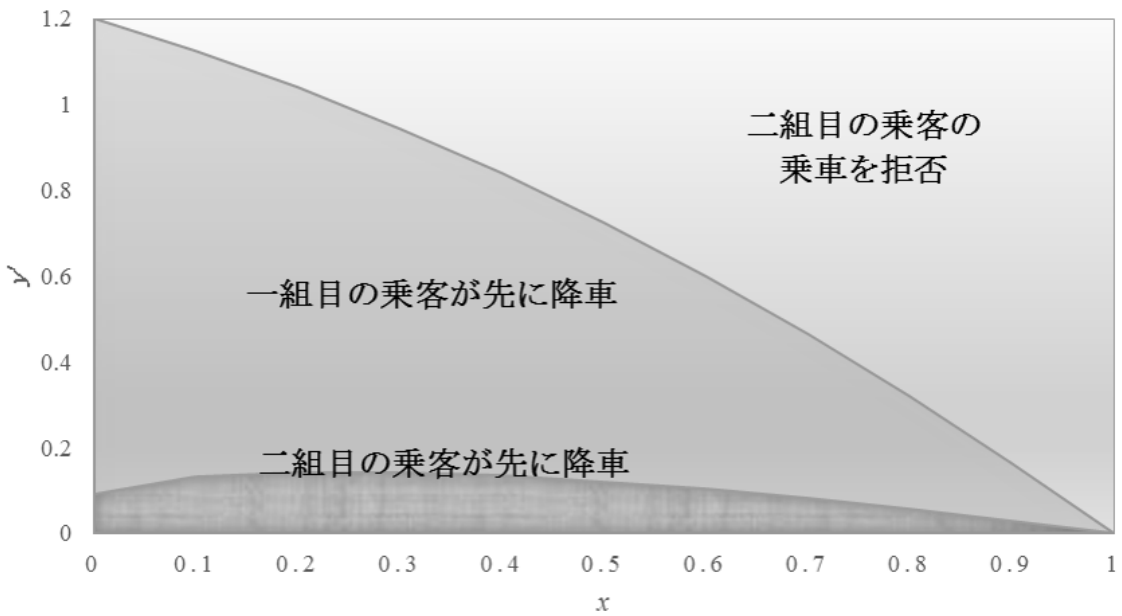

図 7. $\boldsymbol{r_1 = 1.2}$，　$\boldsymbol{r_2 = 1.5}$としたときの意思決定領域

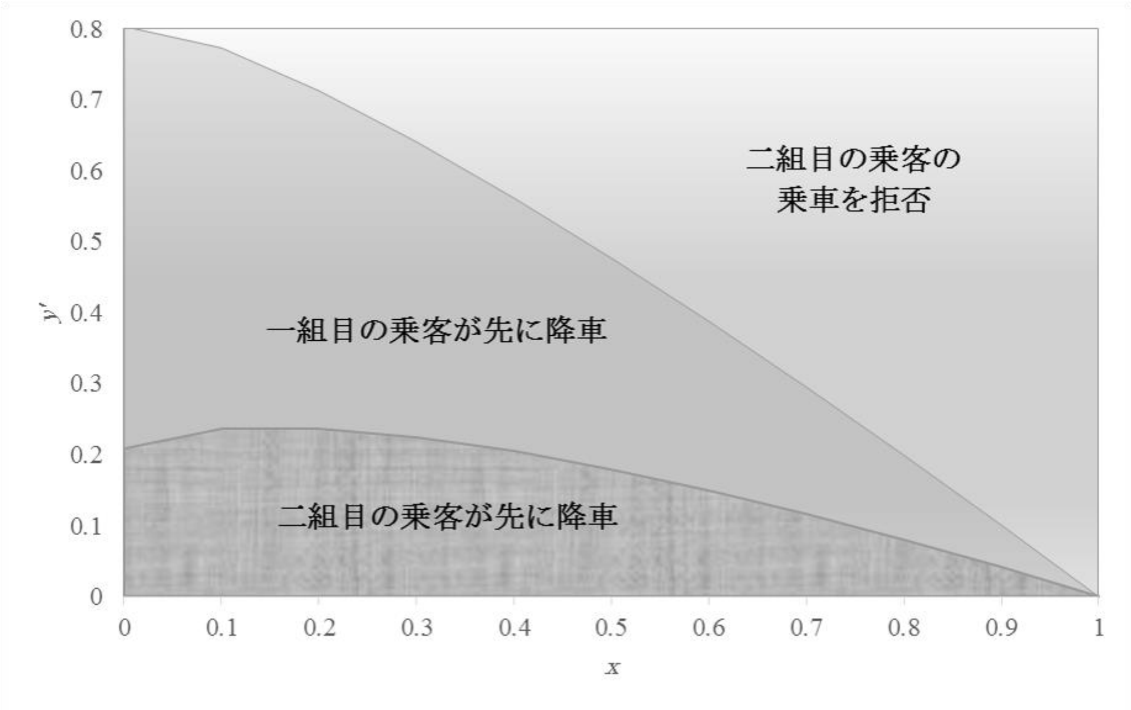

図 8. $\boldsymbol{r_1 = 1.5}$, $\boldsymbol{r_2 = 1.8}$としたときの意思決定領域

4　ケーススタディ

本章では， x 軸上の[0, 1]間に確率的に乗客を発生させ，その目的地も確率的なものとしたときに, 乗合タクシーの総走行距離の期待値の算出とその考察を行う. 本章では, 乗客が確率的に発生したときの一組目の乗客の総走行距離の期待値を計算する. 本章では，発生した二組目の乗客を先に降車させる場合のみの期待値を算出する．期待値の算出によって, 乗客の発生率が与えられているときに一組目の乗客がどの程度走行距離が延長するかを知ることができる.

4.1　残り走行距離に着目した手法での期待値

本節では，3.1 節で提案した手法の総走行距離の期待値を算出する．期待値は，総走行距離と確率をかけることによって計算することができ，走行距離の関数は式(12)と表せる．tは二組目の乗客が発生した地点までの距離，θは一組目の乗客の経路と二組目の乗客の経路がなす角度, rは二組目の乗客の発生地から目的地までの距離である. また, 総走行距離が発生する確率を確率変数$p(t,\theta,r)$と表し，乗合タクシーの総走行距離における期待値$E[f(t,\theta,r)]$は式(13)によって求められる.

$$f(t,\theta,r) = t + r + \sqrt{r^2 + (1-t)^2 - 2r(1-t)\cos\theta}\,, \qquad (0 < t \leq 1, \quad 0 < \theta \leq \pi, \quad 0 \leq r \leq R_3(t,\theta)). \tag{12}$$

$$E[f(t,\theta,r)] = \int_0^1 \int_0^\pi \int_0^{R_3(t,\theta)} f(t,\theta,r)p(t,\theta,r)\,drd\theta dt\,. \tag{13}$$

ここで，確率変数$p(t,\theta,r)$は，積分区間内で 1 となるような確率分布でなければならない．つまり，式(14)によって求められる$u = 1$である．また，確率変数$p(t,\theta,r)$は，各変数の生起確率により，式(15)と表せる．

$$u = \int_0^1 \int_0^\pi \int_0^{R_3(t,\theta)} p(t,\theta,r)\,drd\theta dt\,. \tag{14}$$

$$p(t,\theta,r) = p_t(t)p_\theta(\theta)p_r(r) \tag{15}$$

4.1.1　全ての変数の確率を一定とする場合

本節では，前節で述べた，t, θ, rの生起確率がどの区間をとっても一定の確率となるような場合の期待値を算出する．各変数の生起確率が定数のため，確率変数$p(t, \theta, r)$も定数である．前節の式(3)を$p(t, \theta, r) = 1$とすると，$u = 0.5$となる．$u = 1$とするためには，$p(t, \theta, r) = 2$とおける．式(2)によって期待値を算出すると，$E[f(t, \theta, r)] = 1.07$となる．

4.1.2　角度θの生起確率が減衰していくと仮定する場合

本節では，一組目の乗客の経路と二組目の乗客の経路がなす角度θの生起確率が一組目の乗客の経路から逆方向になればなるほど小さくなるような場合の乗合タクシーにおける総走行距離の期待値を算出する．θの生起確率$p_\theta(\theta)$を式(16)とおく．

$$p_\theta(\theta) = \cos\frac{\theta}{2}, \qquad (0 < \theta \leq \pi). \tag{16}$$

二組目の乗客が発生した地点までの距離tと二組目の乗客の発生地から目的地までの距離rの生起確率は前節と同様にどの区間をとっても一定と仮定する．総走行距離の生起確率$p(t, \theta, r)$は定数vを用いて式(17)と表せる．

$$p(t, \theta, r) = v\cos\frac{\theta}{2}, \qquad (0 < \theta \leq \pi). \tag{17}$$

この場合においても，総走行距離の生起確率$p(t, \theta, r)$は，積分区間内で 1 とならなければならない．式(14)において$u = 1$となるには，$v = 8/\pi$と決定できる．これらを用い，式(2)によって期待値を算出すると，$E[f(t, \theta, r)] = 1.36$となる．

4.1.3　生起確率にパラメータを導入する場合

本節では，一組目の乗客の経路と二組目の乗客の経路がなす角度θと乗客の発生地から目的地までの距離rの生起確率にパラメータλ_1, λ_2を導入した場合の乗合タクシーの総走行距離の期待値を求める．このとき，本節においても，角度θと距離rの生起確率はその値が大きくなるにつれ小さくなるように減衰していくものと仮定する．総走行距離の発生確率$p(t, \theta, r)$は，定数wと変数を用い，式(18)で表せる．

$$p(t, \theta, r) = we^{-\lambda_1\theta}e^{-\lambda_2 r}, \qquad (0 < \theta \leq \pi, 0 \leq r \leq R_3(t, \theta)). \tag{18}$$

式(14)において$u = 1$を満たすためには，$\lambda_1 = 1.0, \lambda_2 = 1.0$ のとき，$w = 5.47$とおける．これらによって総走行距離の期待値を求めると，$E[f(t, \theta, r)] = 1.07$となる．表 1 に$\lambda_1, \lambda_2$

の値を変動させた場合の定数を表し，表 2 に期待値を表す．以下の表より，λ_1, λ_2が大きくなるにつれ，一組目の乗客の延長は小さくなっていくことがわかる．

表 1. パラメータ$\boldsymbol{\lambda_1}, \boldsymbol{\lambda_2}$による定数$\boldsymbol{w}$の変化

$\boldsymbol{\lambda_1/\lambda_2}$	1	2	3
1	5.47	6.30	7.06
2	9.80	11.09	12.52
3	14.18	16.18	18.32

表 2. パラメータ$\boldsymbol{\lambda_1}, \boldsymbol{\lambda_2}$による期待値$\boldsymbol{E[f(t,\theta,r)]}$の変化

$\boldsymbol{\lambda_1/\lambda_2}$	1	2	3
1	1.07	1.04	1.04
2	1.03	1.02	1.02
3	1.02	1.02	1.01

4.2　総走行距離に着目した手法での期待値

本節では，3.2 で提案した手法における総走行距離の期待値を計算する．期待値は，総走行距離と確率をかけることによって計算でき，総走行距離の関数は式(19)と表せる．x は二組目の乗客が発生した地点までの距離，yは二組目の乗客の発生地から目的地までの距離である．また，総走行距離が発生する確率を$p(x, y)$と表し，乗合タクシーの総走行距離の期待値$E[g(x, y_1)]$は式(20)によって求められる．

$$g(x, y) = x + y + \sqrt{y^2 + (1-x)^2}, \qquad (0 < x \leq 1, 0 < y \leq y_1'). \tag{19}$$

$$E[g(x, y)] = \int_0^1 \int_0^{y_1'} g(x, y)p(x, y)dydx\,, \quad (0 < x \leq 1, 0 < y \leq y_1'). \tag{20}$$

ここで，確率変数$p(x, y)$は，積分区間内で 1 となるような確率分布でなければならない．つまり，式(21)によって求められる$c = 1$である．また，確率変数$p(x, y)$は，各変数の生起確率により，式(22)と表せる．

$$c = \int_0^1 \int_0^{y_1'} p(x, y)dydx. \tag{21}$$

$$□(□, □) = □_{□}(□)□_{□}(□). \tag{22}$$

本節も同様に，x, yの生起確率がどの区間をとっても一定の確率となるような場合の期待値を算出する．各変数の生起確率が定数のため，確率変数$p(x, y)$も定数である．前節の式(21)の$p(x, y) = 1$とすると，r_1 =1.2 のとき，$c = 0.09$となる．$c = 1$とするためには，$p(x, y) = 10.91$とおける．式(20)によって期待値を算出すると，$E[g(x, y)] = 1.06$となる．表 2 にr_1の値を変動させたときの，定数の変化とそれぞれの期待値を記す．r_1が大きくなるにつれ，総走行距離の期待値は表 3 のように値が大きくなっていく．

表 3．$\boldsymbol{r_1}$の変動による定数及び期待値の変化

$\boldsymbol{r_1}$	1.2	1.5	1.8
$p(x, y)$	10.91	4.76	3.23
$E[g(x, y)]$	1.06	1.15	1.25

5 おわりに

本研究では，乗合タクシーの意思決定をモデル化した．しかし，3 節のはじめで述べたとおり，本モデルは三組以上の乗客は扱わず，複雑な計算を回避している．また，前提条件や制約が現実問題に十分に対応していないなど，多くの課題を残している．それらの課題を解決することが，今後の研究の方向性である．

パラトランジットは，フォーマルな公共交通機関を補完する役割を果たしており，都市貧困層の雇用源としても重要な役割を担っている．また，車体の製造において，地域の技術や資源を有効活用しており，都市経済の一部門となっている．多方面で重要な働きを見せる一方で，バスと比較して乗客一人当たりの輸送に必要な道路容量が二倍程度という道路利用の非効率性，頻繁な停車による交通流の乱れが，交通渋滞の原因の一つとなっていることが指摘されている[4]．本研究で提案した意思決定モデルが，パラトランジットのシステム効率化の手助けとなり，最終的に交通渋滞の緩和に繋がることを願ってやまない．

参考文献

[1] 岩田鎮夫：“発展途上国の大都市における公共交通の成立に関する研究”，東京大学工学系土木工学専攻博士論文，1995.

[2] 安部遼祐：“個別型公共交通の賃金システムに関する通時的・共時的比較考察-ダッカのリキシャから東京の人力車・タクシーまで-”，東京大学大学院工学科研究科社会基盤学専攻修士論文，2012.

[3] 安藤徹哉，ウァントゥラポーチ，ピーチャイ，小野哲子，福島駿介：“発展途上国地方中核都市におけるパラトランジット型公共交通機関の研究”，日本建築学会計画系論文集＝Transactions of AIJ. Journal of architecture, planning and environmental engineering，No. 580, pp. 125–131, 2004.

[4] 澤喜司郎：“タイ王国の道路交通とトゥクトゥク文化”,山口経済学雑誌,

Vol. 57, No. 3, pp. 133–152, 2008–09.

[5] 太田勝敏：“東南アジア都市の路面公共輸送機関”，交通工学,

Vol. 17, No. 3, pp. 37–43, 1982.

[6] 太田勝敏：“発展途上国の都市交通計画の課題”，土木学会論文集,

Vol. 5, No. 395, pp. 15–21, 1988.

[7] R.Cervero：“Informal Transport in the Developing World”, UN–HAVITAT, 2000.

[8] R.Cervero：“Informal transport, A global perspective, Transport Policy”,

Vol. 14, No. 6, pp. 445–457, 2007.

[9] 外尾一則，ヨッポン・タナボリブーン，“開発途上国におけるパラトランジットの特質”，土木計画研究・講演集，Vol. 16, No. 1, pp. 917–924, 1993.