

過疎地域の交通手段選択モデルにおける 階層ベイズ推定法の適用に関する研究

A study on Application of Hierarchical Bayesian Estimation Method to Transportation Choice Model in Depopulated Area

北海道大学大学院工学院 ○学生員 千葉令太郎 (Ryotaro Chiba)
北海道大学公共政策大学院 正員 岸 邦宏 (Kunihiro Kishi)
北海道大学大学院工学研究院 正員 高野 伸栄 (Shin-ei Takano)

1. はじめに

交通弱者の移動手段確保のため、過疎地域においてドアツードアの送迎を乗合・低料金で行う、デマンド型乗合交通を導入する自治体が増えている。しかし、導入は必ずしも成功しているとは言えず、実際には安価な利用料金に対して利用者は少なく、運行経費の赤字部分を自治体が補填し、厳しい財政状況から撤退してしまう地域は少なくない。本研究ではこうした過疎地域におけるデマンド型乗合交通として、地域のタクシー会社が主体となり、同乗者で料金を割り勘する乗合タクシーの導入を検討する。これによって、利用者が料金的なメリットを得るだけでなく、自治体にとっても財政負担がない移動サービスを実現できると考える。

その上で、乗合タクシーの利用者を推定する際に、個人間の異質性を考慮して MCMC 法を用いた階層ベイズ推定法による予測手法の適用を試みる。従来多用されてきた最尤推定法では個人を属性によってセグメント化し、各セグメントで「代表的個人」を仮定して分析を行っている。より現実的なことを考えると、利用者1人1人の個人間の異質性や場所差などを考慮したミクロな分析手法の検討が必要であるが、このように統計モデルを複雑にすることでパラメータの推定は難しくなる。そこで階層ベイズ推定法によって確率分布で表現し、パラメータの事後分布を求めることによって、より現実的な交通行動分析を行うことができると考える。

以上より、本研究では交通手段選択モデルにおける階層ベイズ推定法の適用可能性について明らかにすることを目的とする。そして、構築したモデルより過疎地域の郊外と市街地を結ぶ交通手段として、割り勘型の乗合タクシー導入における需要推計に利用する。

2. 研究対象地域

本研究の対象地域は、北海道上川地方北部に位置する士別市である。士別市の郊外には広大な農村部が広がり、住居が広域に分散している。一方で都市機能は中央市街地に集約されているため、郊外から市街地までの生活交通を支援する交通施策が必要である。現在の士別市の郊外と市街地を結ぶ主な公共交通は、路線バスとデマンドバス、市街地を循環して運行するバスが中心である。しかしながら運行している路線バスには、1便あたり3人に満たない利用の路線が複数存在し、士別市全体の移動支援策に要する経費は年間約1億円かかっている。その

ため、利用実態に即した予約運行型の乗合交通を導入し、郊外住民の移動支援策を効率化する必要がある。

3. 士別市次世代モビリティ推進会議における検討

士別市において次世代モビリティ推進会議が立ち上げられ、将来の交通体系のあり方について検討を重ねている。その1つに多寄町における乗合タクシーの導入を検討しており、実証運行の前に乗合タクシーの利用意向の事前調査を2021年6月に実施した。全世帯である361世帯に配布を行い、106世帯からの回答が得られた。図-1のように半数以上の回答者が、乗合タクシーが導入された場合「利用する」と回答しており、安価に利用できる郊外と市街地をドアツードアで結ぶ交通手段を必要としていることがわかった。特に利用意向が高かったのは免許の返納を検討し始める71歳以上であり、高齢者ドライバーの事故防止に向けて早期の免許返納が望まれる中で、自家用車の代替交通手段として期待できることが分かった。また、利用希望曜日・時間帯を表-1のように比較すると、各曜日・時間帯で乗合発生が期待でき、特に「火・水・木曜日」の利用希望者が多いことが分かった。

意識調査に加えて、利用者から直接意見を伺うために2021年9月27日(月)多寄町中多寄地区で住民の方々との意見交換会を実施した。地区内だけでなく、日常的に買い物や通院目的で市街地へ移動することが多く、バス停から離れて暮らす方や、運転免許を返納した方、これから返納を検討している方、さらには送迎してもらえ家族などが近くにいる方にとってはこうしたサービスが重要であることが分かった。

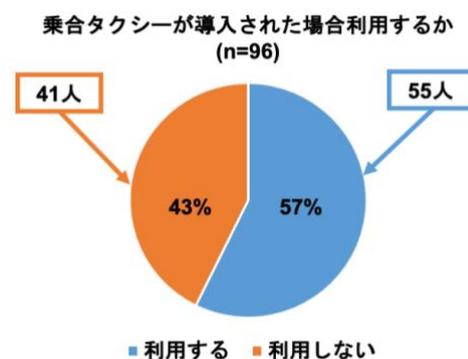


図-1 事前調査における乗合タクシーの利用意向

表-1 事前調査における乗合発生予測の分析結果

曜日	時間帯	多寄→中央市街地	中央市街地→多寄
月曜日	午前	2名	1便
	午後	2名	1便
	合計	4名	2便
火曜日	午前	8名	3便
	午後	3名	1便
	合計	11名	4便
水曜日	午前	6名	2便
	午後	4名	2便
	合計	10名	4便
木曜日	午前	12名	4便
	午後	5名	2便
	合計	17名	6便
金曜日	午前	3名	1便
	午後	4名	2便
	合計	7名	3便
土曜日	午前	2名	1便
	午後	1名	1便
	合計	3名	2便
日曜日	午前	5名	2便
	午後	2名	1便
	合計	7名	3便

以上の結果を踏まえて、多寄町において乗合タクシーの実証運行が令和3年12月～令和4年2月の期間で実施することとなった。運行形態としては、12月・1月には利用者の自宅から多寄中心部までの運行経路で、市街地に行く際には路線バスに乗り換えが必要になる状況での実施。そして2月には本研究で対象としている、自宅から土別市街地までの直通の運行経路での実施となっている。運行曜日と便数に関しては表-1の結果より、毎週火・水・木曜日に3便での実施となった。

4. 乗合タクシーの利用意向に関する意識調査

(1) 意識調査の概要

本研究では、多寄町のみならず他の郊外地区においても乗合タクシーの導入を検討するため、意識調査より市街地に行くために乗合タクシーを利用するかどうかの交通手段選択モデルを構築する。調査の概要について表-2に示す。調査票は2021年11月に合計1303世帯、2606票を郵送配布・郵送回収方式で行い、合計408世帯から600票の回答が得られた。配布地域は土別市の郊外であり、前述の移動支援策の効率化が必要な地域である。

表-2 意識調査の概要

調査期間	配布：11月12日（金） 締切：11月26日（金）					
調査方法	郵送配布・郵送回収					
配布箇所	多寄町		上土別町		朝日町	
配布世帯数 / 配布票数	361	722	327	654	615	1230
回収世帯数 / 回収率	126	34.9%	99	30.3%	184	29.9%
回収票数 / 回収率	185	25.6%	146	22.3%	270	22.0%
全体						
回収世帯数	408世帯(31.3%)					
回収票数	600票(23.0%)					

(2) 乗合タクシー選択モデル構築のための調査票の設計

年齢や性別、家族構成や免許所有の有無等の個人属性や、地区内と市街地のそれぞれにおける日常的な外出行動についての設問をはじめ、乗合タクシー選択モデルを構築

するために、土別市の郊外と市街地を結ぶ乗合タクシーが運行された場合を仮定し、この乗合タクシーを使うか、他の交通手段を使うか回答してもらった。この際、要因と水準の設定においては、表-3のように要因ごとに2水準と3水準を設定し、実験計画法を用いてL₉直交表により9つの票種に割り付けて、組み合わせを作成した。これを実際の調査票では図-2に示す一例のように、図と写真を用いて説明し、1人に対して3票種の設問に答えてもらうこととした。

表-3 要因と水準の設定

要因	水準1	水準2	水準3
乗合タクシーの片道の基本料金	1800円	3000円	4200円
乗車人数	1人で乗る	2人で乗る	3人で乗る
1日の運行便数	1日7便	1日5便	1日3便
市内循環バス1日乗り放題チケット	無料配布無し	無料配布有り	

図-2 調査票における設問の提示例

(3) 回答者の属性と日常的な外出行動

図-3に回答者の年齢と性別を示す。また、この回答者らの地区内と市街地それぞれにおける日常的な外出行動について図-4に示す。日用品等の購入のため7割ほどの回答者が週に1回以上市街地に地区内で外出すると回答していることに対して、買い物や通院、サークル活動、老人クラブなどの集まり等のために、週1回以上市街地に足を運ぶ人も6割を超えており、日常的に市街地に行く頻度が高いことがわかる。さらに図-5の移動手段を比較すると、自身の運転で外出することが主になっていることがわかる。しかし、そのうち3割以上は運転に対して負担や不安を感じながら運転していると回答していた。これは回答者の約半数が最寄りのバス停まで徒歩15分以上かかると回答しており、バス停まで歩く大

変さから、自家用車で移動を余儀なくされているというところである。そのため乗合タクシーの導入により、ドアツードアの移動が可能になることによって、こうした移動の負担や不安の解消にも繋がると考える。

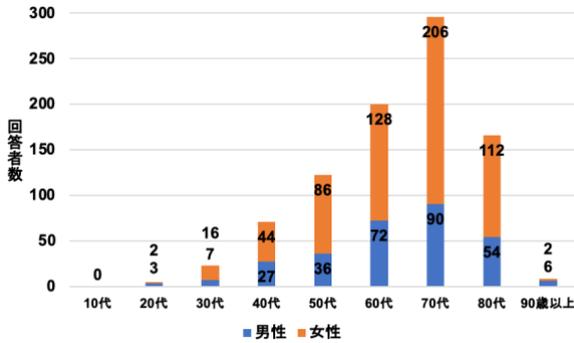


図-3 回答者の年齢と性別

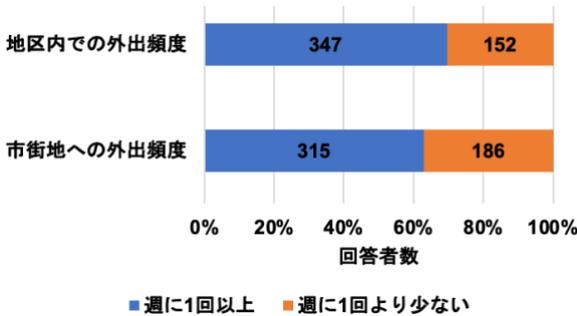


図-4 地区内と市街地への日常的な外出頻度

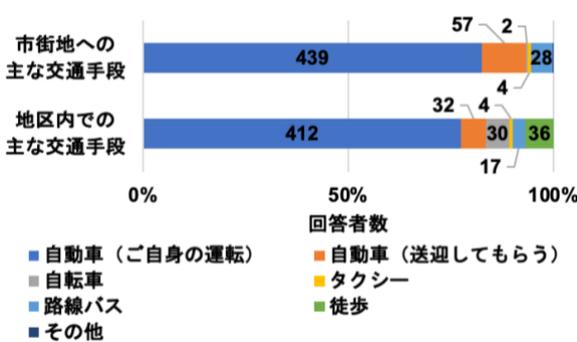


図-5 地区内と市街地への外出時の主な交通手段

5. 最尤推定法による乗合タクシー選択モデル

(1) 二項ロジットモデルの構築

L₉直交表に割り付けた各サービスレベルについて二項ロジットモデルを用いて、利用意向がある、ないの選択を表す交通手段選択モデルを構築した。パラメータの推定結果を表-4に示す。乗合タクシーの利用意向には年齢、乗合タクシーの基本料金、乗合人数が有意水準0.1%で影響を与え、市内循環バスの乗り放題チケットの配布が有意水準5%で影響を与えることがわかる。なお、1日の運行便数については有意とはならなかった。

構築したモデルより説明変数のオッズ比を比較すると、乗合タクシーの利用率は年齢が10歳上がるごとに1.31倍、運賃が1000円上がるごとに0.75倍、乗合人数が1

人増えるごとに1.38倍、市内循環バスの無料チケットが配布されることにより1.35倍となることがわかる。

表-4 最尤推定法によるパラメータの推定結果

	(Intercept)	Age	Fare	Riding	Ticket
係数名	b1	b2	b3	b4	b5
係数値	-2.71	0.27	-0.28	0.32	0.30
z value	-6.03	4.67	-5.84	3.73	2.02
Pr(> z)	***	***	***	***	*
サンプル数	1290	修正済み尤度比		0.303	
		的中率		79.4%	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

$$P = \frac{1}{1 + \exp(-U)}$$

$$U = b_1 + b_2 \text{Age} + b_3 \text{Fare} + b_4 \text{Riding} + b_5 \text{Ticket}$$

Age: 回答者の年齢

Fare: 乗合タクシーの片道の基本料金

Riding: 乗合タクシーの乗車人数

Ticket: 市内循環バスの乗り放題チケットの有無

P: 乗合タクシーの利用率

U: 選択肢に対する効用

(2) 乗合タクシーの利用促進に向けて

多寄町を例に取り上げ、実証実験と同じ片道の基本料金3000円の条件下で運行した際の利用率の年齢別変化を図-6に示す。なおこの時、乗合人数の変化を色で分け、実線は市内循環バスの乗り放題チケット配布有り、点線は配布無しの状態をそれぞれ示している。

若い年代は高齢者に比べて、運転に不安や負担を抱いている人が少ないからか利用は望みづらいが、60代以上が過半数を占める多寄町においては、乗車人数が増えることで1人あたりが負担する料金が減少することや、乗合タクシーを利用して市街地に訪れた際に市内を自由に移動できる循環バスの乗り放題チケットの配布を行うことによって、高齢者の利用が期待できることがわかる。

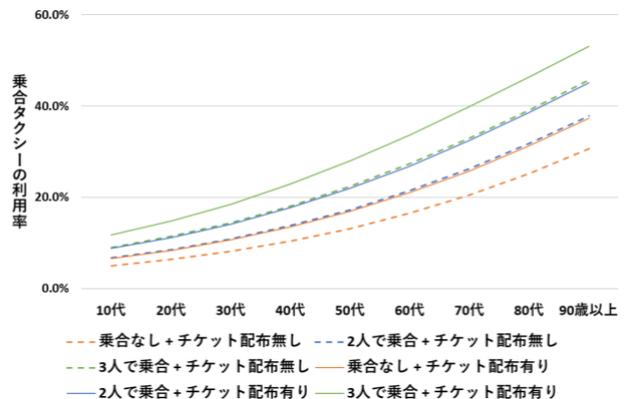


図-6 乗合タクシーの利用率の年齢別変化(多寄町)

これらの効果について、図-7に示した乗合タクシーの片道の基本料金との比較から考える。なおこの時、士別市の平均年齢が50歳であることから、年齢は50代と設定した。乗合が発生することによって利用率は4.1%

増加するが、これは片道の基本料金を 1140 円値下げすることと同等の効果があることがわかった。また、市内循環バスの乗り放題チケットを配布することによって利用率は 3.8%増加するが、これは片道の基本料金を 1070 円値下げすることと同等の効果があることがわかった。この効果は上土別町・朝日町においても同様である。

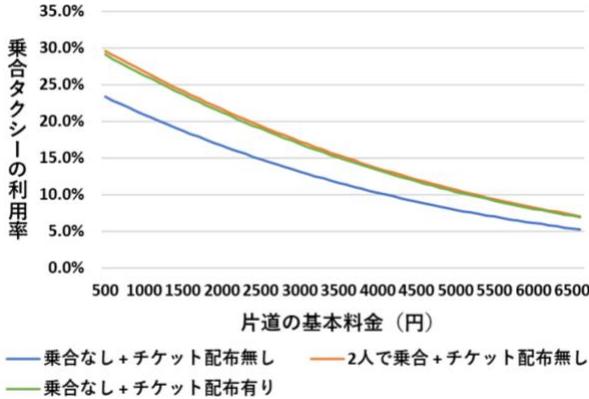


図-7 利用率と片道の基本料金

6. 階層ベイズ推定法による乗合タクシー選択モデル

最尤推定法によるモデルによって、乗合タクシーの利用率についてある程度説明できていると考えられるが、過分散の問題より適切な検討とは言えない可能性がある。より複雑な現象を考慮した柔軟なものに展開するには、グループ差を反映したパラメータの推定を行う必要があると考え、平均 0、標準偏差sの正規分布に従う個人差 r_i を組み込んだ。さらに現実的なことを考えると、パラメータはただ一つの真値を持つと考えて推定するのではなく、パラメータも確率変数として考える必要があり、本研究ではパラメータ b_i とsの事前分布を無情報事前分布と設定した。これより構築したモデル式は以下の通りである。なお、Nは回答者の人数、Iは回答データ数（ここでは 1290）、nとiはそのインデックスである。

$$x[i] = b_1 + x_{\text{個人差}}[Person_ID[i]] + x_{\text{サービスレベル}}[i]$$

$$q[i] = \text{inv_logit}(x[i])$$

$$Y[i] \sim \text{Bernoulli}(q[i])$$

$$x_{\text{個人差}}[n] = b_2 \text{Age}[n] + b_{\text{個人差}}[n]$$

$$b_{\text{個人差}}[n] \sim \text{Normal}(0, s_p)$$

$$x_{\text{サービスレベル}}[i] = b_3 \text{Fare}[i] + b_4 \text{Riding}[i] + b_5 \text{Ticket}[i]$$

本研究では、パラメータの推定方法にマルコフ連鎖モンテカルロ法 (Hamiltonian Monte Carlo 法) を用いる。ここではイテレーションを 10000 回とし、事前分布の影響を受けぬように最初の 5000 回のデータをバーンインしチェーン数は 4 回、イテレーションの大きさに合わせて間引き間隔は 5 とした。この時の事後確率分布は図-3 のようになり、推定された説明変数のパラメータおよび、

個人差のパラメータの標準偏差の平均と Rhat について表-3 に示す。図-3 よりチェーンごとのカーネル密度は同様であると考えられる。また、全てのパラメータにおいて Rhat は 1.05 以下であり、自己相関も低いことから収束していると考えられる。

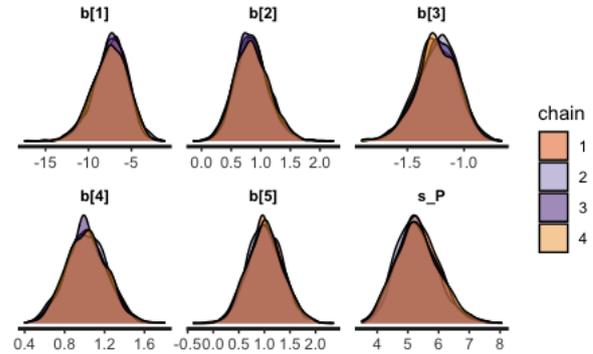


図-8 各パラメータの事後分布

表-5 階層ベイズモデルの推定パラメータ

	(Intercept)	Age	Fare	Riding	Ticket	
係数名	b1	b2	b3	b4	b5	s_P
2.5%	-11.69	0.32	-1.61	0.63	0.37	4.07
mean	-7.47	0.85	-1.24	1.02	1.01	5.31
97.5%	-3.85	1.46	-0.9	1.43	1.69	6.79
Rhat	1.0004	1.0002	1.0016	0.9999	1.0000	1.0028

2 つのモデルの当てはまり具合を評価する方法として、AUC の比較を行う。AUC は ROC 曲線を作成した時に、グラフの曲線より下の部分の面積のことであり、0 から 1 までの値をとり、値が 1 に近いほど判別能が高いことを示す。最尤推定法によるモデルから得られた AUC は 0.671 に対して、階層ベイズモデルにより得られた AUC は 0.972(95%ベイズ信頼区間は 0.967~0.977)であり、階層ベイズモデルの方が当てはまりよいことが示された。

7. おわりに

本研究では、過疎地域の郊外と市街地を結ぶ交通手段として割り勘型の乗合タクシーを取り上げ、意識調査よりその必要性を示した。さらにその利用に関して、最尤推定法と階層ベイズ推定法によりモデルを構築し、階層ベイズモデルの有用性を示した。乗合タクシーの利用促進に向けては、運賃を値下げすれば利用が望まれるが、これでは主体となる地域のタクシー会社の収益が減少し、維持することが難しくなってしまう。しかし、前述のように乗合を発生させることや乗り放題チケットの配布が利用促進に寄与するのであれば、外出時間を決めていない人に乗合タクシーの利用を促すような取り組みや、バス事業会社と協力しながら、乗合タクシーを利用して市街地に訪れた方の市街地内の移動の利便性向上に向けた取り組みを行う必要があると考える。

参考文献

- 久保拓弥：データ解析のための統計モデリング入門 一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC、岩波書店、2012