

自動運転タクシーと都市鉄道との連携評価 に向けた RP/SP 交通機関選択モデル

萩原 啓太¹・岩倉 成志²

¹学生会員 芝浦工業大学大学院理工学研究科社会基盤学専攻 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

E-mail: ah20074@shibaura-it.ac.jp

²正会員 芝浦工業大学 教授 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

E-mail: iwakura@sic.shibaura-it.ac.jp.

今後展開が予想される自動運転タクシーは、タクシー料金の低廉化や車両供給増による待ち時間減少により、既存の公共交通（都市鉄道や路線バス）の需要に大きく影響を与える可能性がある。このため、自動運転タクシーの需要を予測するモデルの開発が必要と考えた。筆者らは、自動運転タクシーの料金やマルチタスク効果、待ち時間を LOS に反映した SP 調査データを独自に取得するとともに、H30 東京都市圏 PT 調査と同調査期間のタクシープローブを用いた精度の高い乗車待ち時間データを含む LOS データで RP データを構築した。この SP と RP データを用いて、自動運転タクシーを選択肢集合に組み込んだ交通機関選択モデルの構築に取り組んでいる。加えて、この交通需要予測モデルを用いて、東京都市圏の一都市鉄道路線を対象として自動運転タクシーを導入した際の交通需要変動の評価と、異なる交通機関のモーダルミックスが利用者利便を向上させる可能性を分析する。

Key Words: RP/SP model, autonomous taxi, demand forecasting, waiting time, GPS data

1. はじめに

近年、自動運転タクシー（以下 AT : autonomous taxi）の導入が都心で検討され、都市交通や都市環境の新たな可能性を議論されている。米国や中国でも AT の営業を開始し、わが国でも導入が期待されている。AT はドライバー人件費を削減することができ大きな需要の見込みがあるため、現状のタクシーより低料金で利用することができるという報告がある。Abe¹⁾は 10-20km の短距離では自動運転タクシーの運賃が最大 60%まで削減できることを示した。また既存の公共交通（都市鉄道や路線バス）の需要に大きく影響を与える可能性がある。Mori²⁾ら(2022)は AT サービスの導入で、利用回数が 11 倍に増加すると示し、Oh³⁾ら(2020)は AT の無制限の導入が、公共交通と AT の競合を示唆することから、AT の利用増加の見込みがある一方、公共交通機関との競合の危険性がある。このため、AT の需要を予測するモデルの開発が必要と考えた。

本研究では、独自の SP 調査データと H30PT による RP データを用いて、交通機関選択モデルを推定し、需要推計を行い、各交通機関の利便性の特性を考察する。

以下、2.では AT の料金やマルチタスク効果、待ち時間を LOS に反映した SP 調査データを独自に取得するとともに、H30 東京都市圏 PT 調査と同調査期間のタクシープローブを用いた精度の高い乗車待ち時間データを含む LOS データで RP データを構築する。3.ではこの SP と RP データを用いて、AT を選択肢集合に組み込んだ交通機関選択モデルの構築に取り組む。また需要予測用に定数項修正を行い、その現況再現結果を示す。4.ではケーススタディをおこなう地域とシナリオを示した後に RP/SP 交通機関選択モデルを用いて、AT を導入した際の交通需要変動の評価と鉄道と AT との協調案の評価を行う。5.で知見と課題を示す。

2. データ概要

(1) RP データの概要

H30 のパーソントリップ調査データを活用して、業務目的で、代表交通機関が鉄道（端末交通が徒歩のみ）・バス・タクシーのサンプルに偏りがないように抽出し、LOS データを作成した。サンプル抽出の割合として、鉄

道：309，路線バス：48，タクシー：216である。各交通機関の所要時間，一人あたりの費用，待ち時間（運行間隔2），徒歩時間（アクセスおよびイグレス徒歩時間）を変数として設定した。データの収集にはGoogleマップの乗換検索で調べ，バスの経路についてはGoogleマップに表示されない場合，都営交通の乗換検索を使用して調べた。

タクシーの待ち時間は空車タクシーのプロープデータの1時間毎の平均待ち時間に日本交通タクシーの拡大係数を乗じて算出した。以下の手順で行った。①日本交通タクシーの1日のGPS記録を活用し9時台から20時台を1時間毎に分けた。②H3OPT ジオコードで用いて発着地の緯度経度を算出し，目的地を考慮して出発地に乗車可能なタクシーのGPSを以下の優先順位で選定した。優先順位1は，発着地点から最も近い国道・地方道で，目的地の方角に向かう車両である。優先順位2は，出発地から一度の右折または左折で目的地の方角に向かう車両（空車交通量も加味して），優先順位3はそれ以外の道路を走行する車両とした。なお，これらの条件に基づき，最大アクセス距離を200mと設定し，交差点のデータは含まず，単一の進行方向に沿ったGPSデータのみを抽出した。さらに駅や出発地の手前に駅前広場がある場合には，駅前広場に停車している車両も対象とした。③1時間毎のタクシー台数と平均待ち時間を算出した。

また日本交通タクシーの待ち時間を全タクシーの待ち時間に拡大するため，日本交通タクシーの拡大係数の調査に関しては，PTデータから主要地点20か所を抽出。2)乗車位置・乗車時間帯で20分間の空車タクシーの待ち時間(日本交通と全タクシー)を計測し，その計測した値の平均値より拡大係数を算出した。

(2) SP 調査の概要

実施詳細は東京23区在住の楽天インサイト会員1000名を対象としたWeb調査である林・岩倉⁴⁾によるSP調査データを活用する。内訳は男女共に500人ずつ，20代～60代以上を10歳刻み5区分で200人ずつである。調査実施期間は2022年3月18日から21日，SP調査のサンプル数は1000人×3パターンの水準設定で業務トリップの計3000サンプルを活用した。

ATの定義として，本調査では無人の自動運転のタクシーとし，見ず知らずの他人との相乗りは無いものとした。また，高速Wi-Fiでリモート会議や高音質音源で音楽を聴くこと，センサー(レーダー，カメラ，GPS)で交通状況を認識しながら最適なルートを自動で選択できることとした。

次に配車方法はスマートフォンのアプリより24時間配車ができ自分が利用したい場所(乗りたい場所・降りたい場所)を指定し，料金は電子マネーやクレジットカ

表-1 モデル推定結果

	RP		SP		RP/SP	
	パラメータ	t値	パラメータ	t値	パラメータ	t値
所要時間(分)	-0.049	-2.83	-0.032	-4.83	-0.070	-5.17
マルチタスク：所要時間(分)			-0.021	-3.04	-0.067	-4.78
費用(100円)	-0.136	-9.01	-0.185	-9.02	-0.140	-9.30
鉄道・バスの待ち時間(分)	-0.074	-3.05	0.001	0.02	-0.059	-2.85
タクシーの待ち時間(分)	-0.158	-4.38	-0.077	-2.70	-0.155	-4.85
徒歩時間(分)	-0.083	-4.81	-0.027	-3.01	-0.071	-4.66
鉄道の定数項(RP)	-0.223	-0.75			-0.478	-1.86
バスの定数項(RP)	-0.752	-2.05			-0.907	-2.65
鉄道の定数項(SP)			0.221	1.11	0.925	3.16
バスの定数項(SP)			-1.545	-6.43	-2.439	-4.06
スケールパラメータ(μ)					0.496	4.94
サンプル数	573		3000		3573	
尤度比	0.323		0.226		0.228	
自由度調整済み尤度比	0.311		0.223		0.225	
時間価値	35.95		17.46		49.81	

ードで支払うことをしている。また安全性の説明は米国の公道実験結果に基づいて，現在のタクシーの事故リスクと同等という前提とした。

3. 交通機関選択モデルの推定結果

(1) 交通機関選択モデルのフレームワーク

RPデータとSPデータを統合した交通機関選択モデルを構築した。選好の顕在化の方法の違いによるSPとRPでの誤差項の大小の違いを表現するため，以下で定式化⁵⁾し，同時推定を行った。

<RPモデル>

$$U_{in}^{RP} = \beta' X_{in}^{RP} + \alpha' W_{in}^{RP} + \varepsilon_{in}^{RP} \equiv V_{in}^{RP} + \varepsilon_{in}^{RP} \quad (1.a)$$

($i = 1, \dots, J_n^{RP}, n = 1, \dots, N^{RP}$)

<SPモデル>

$$U_{in}^{SP} = \beta' X_{in}^{SP} + \gamma' Z_{in}^{SP} + \varepsilon_{in}^{SP} \equiv V_{in}^{SP} + \varepsilon_{in}^{SP} \quad (1.b)$$

($i = 1, \dots, J_n^{SP}, n = 1, \dots, N^{SP}$)

<確率項の分散の関係>

$$\text{Var}(\varepsilon_{in}^{RP}) = \mu^2 \text{Var}(\varepsilon_{in}^{SP}), \quad \forall i, n \quad (1.c)$$

X_{in}^{RP} , W_{in}^{SP} , Z_{in}^{SP} : 個人nの選択肢iに対する説明変数ベクトル， α , β , γ : 未知係数ベクトル， μ : ランダム項の分散の違いを表すスケールパラメータ， J_n : 個人nの選択肢集合に含まれる選択肢の数，N: データに含まれる観測数

<対数尤度関数>

$$\ln L^{RP}(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^{N^{RP}} \sum_{i=1}^{J_n^{RP}} d_{in}^{RP} \ln P_n^{RP}(i) \quad (2.a)$$

$$\ln L^{SP}(\beta, \gamma, \mu) = \sum_{n=1}^{N^{SP}} \sum_{i=1}^{J_n^{SP}} d_{in}^{SP} \ln P_n^{SP}(i) \quad (2.b)$$

$$\ln L^{RP+SP}(\alpha, \beta, \gamma, \mu) = \ln L^{RP}(\alpha, \beta) + \ln L^{SP}(\beta, \gamma, \mu) \quad (2.c)$$

(2) 推定結果

表-1にRPモデル，SPモデル，RP/SPモデルの推定結

果を示す。

a)RPモデルの推定結果

公共交通機関の待ち時間とタクシーの待ち時間で違いを表すため、個別のパラメータを推定した。その結果、タクシーの待ち時間>鉄道・バスの待ち時間となり、タクシーの待ち時間の変動がより大きな影響を与えることを示せた。

b)SPモデルの推定結果

ほとんどの変数では、5%有意で妥当な値であり、マルチタスク効果によって時間価値が低下され、林・岩倉と同様な値を示した。しかし鉄道・バスの待ち時間は有意の結果とならなかった。

c)RP/SPモデルの推定結果

パラメータ推定では、変数はパラメータを共有し、定数項はRPとSPで別々に推定を行った。その結果、全ての変数で5%有意になり、尤度比も交通機関選択モデルとして一定の精度は出ている。

(3)定数項修正と精度検証結果

表-1で推定したRP/SPモデルのパラメータを使用し、本モデルが実際の交通手段割合と一致するように定数項修正をした。図-1は、計画基本ゾーン間でのOD量の実績値と予測値を可視化したグラフであり、相関係数は0.9865、近似曲線の傾きは0.97より、概ね実績値と一致することが読み取れる。

4. ケーススタディ

(1)対象地域の選定とシナリオ

各駅停車のみで運行され、郊外と都心を結ぶ埼玉高速鉄道線と東京メトロ南北線を対象路線とし、その沿線地域を対象エリアとした。東京メトロ南北線は、東京都内を南北に結ぶ地下鉄路線であり、麻布十番駅、四ツ谷駅、永田町駅などを含む。南北線を選定した理由として、低速度であり、駅間距離が短いため、特にATと地下鉄が競合する可能性があり、本分析の対象地域として選定した。

対象トリップは通勤と業務トリップを対象とし、対象エリアのトリップのODデータは、H30のPT調査のトリップに拡大係数を乗じて作成した。また以下の設定を設けており、予測値を評価する上で、大きな課題と認識している。①道路・駅前広場の道路渋滞や供給力の考慮しない、②発生・分布交通量は現状と仮定、③AT利用時の同行人数は0人とする。

表-2のシナリオS1、S2での需要予測を行う。その中で(1)感度分析での(a)各交通機関の総需要量評価、(b)エリア別の需要変動評価、(2)ATと都市鉄道との協調案を

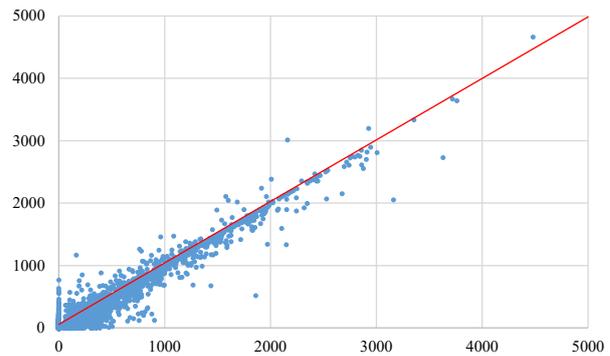


図-1 実績値と予測値の精度検証

表-2 シナリオ設定

S1	待ち時間を3分として、運賃は現行のタクシーの料金から0%、-20%、-40%、-60%、-80%に設定した。 (バスは現状の運賃)
S2	ATの運賃は現行のタクシーの料金から-40%として、待ち時間を1分、4分、7分、10分、13分に設定した。 (バスは現状の運賃)

分析する。

(2) 感度分析

(a)各交通機関の総需要量

図-2はATの運賃割引率による需要変動(S1)を表している。ATの運賃が安くなると、南北線からの転移で大幅なAT需要の増加が見込まれる。特に運賃が-40%から-60%の間でATの需要数が大幅に増加した。

図-3はATの待ち時間による需要変動(S2)を表している。待ち時間の減少でATの大幅な需要増加が見込まれることを示した。このことから今後の車両の増加による待ち時間の短縮が需要増加につながる可能性があると考えられる。

図-4は、自動運転バスの待ち時間が現状の0.4倍に短縮された場合の距離別のバスとATの需要の変化を算出した。自動運転バスの利用が4kmまでは需要が増加しており、短距離移動において自動運転バスが利用されやすい可能性があるが、ATと自動運転バスの競合が生じている。

(b)エリア別の需要変動

図-5はS1で運賃割引率が-60%の場合のATの需要増加数をエリア別に可視化した値となる。駅が集まる都心において利用者数が増加していることを示した。特に東京駅・新宿駅などの商業地域において、利用者数が増加することが読み取れる。

図-6は自動運転バスの待ち時間が0.4倍の場合の自動運転バスの需要増加数をエリア別に可視化した。ATと同様に都心で多く増加は見られた。鉄道駅空白地におけ

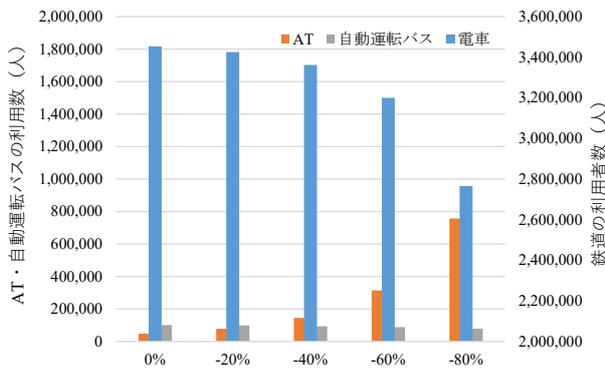


図-2 ATの運賃割引率による需要変動(S1)

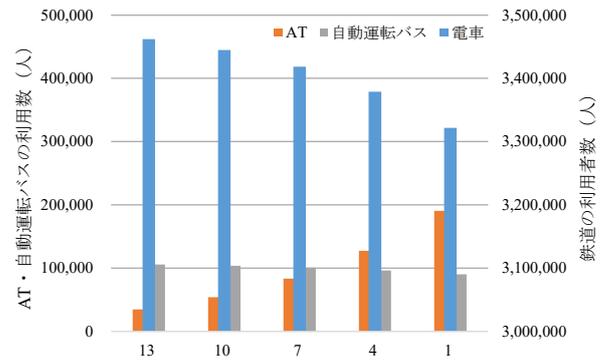


図-3 ATの待ち時間による需要変動(S2)

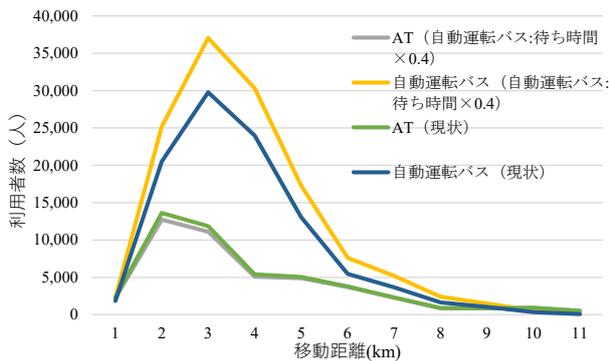


図-4 距離帯別のAT・自動運転バスの影響比較

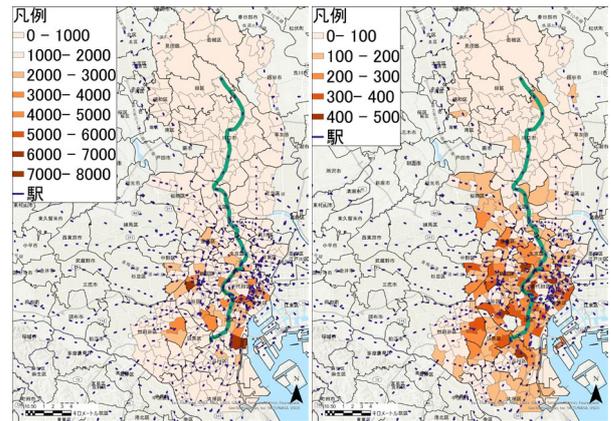


図-5 ATの増加数(人) 図-6 自動運転バスの増加数(人)

るバスの利用者数も増加している。

(3) ATと都市鉄道の協調

(a)設定条件

ATと都市鉄道との競合を防ぐために、鉄道側の施策に焦点を当てた分析は少ない。ここでは、南北線に快速列車を導入することで速達性を向上させ、鉄道と自動運転バス・タクシーとの競合を抑制できるかを分析する。

特に西ヶ原駅や志茂駅などの利用者数が少ない駅については、一部の列車を通過させることで利用者の一部をATや自動運転バスでカバーすることで、地下鉄の速達性向上が期待でき、ATと都市鉄道をコーディネートできると考えた。

快速列車と各駅停車が交互に運行することと仮定し、1駅通過することによる短縮効果は1分とした。また通過駅が出発駅や到着駅の場合、待ち時間が2倍と仮定しLOSを組み立てた。通過駅として選定した駅は、南北線の乗り換え路線がない駅(六本木一丁目駅を除く)、埼玉高速鉄道線の南鳩ヶ谷駅とする。今回、乗り換えるデータを組み込んでいないため、シミュレーションで出力する対象は埼玉高速鉄道線・南北線・東急目黒線(目黒駅～日吉駅)までを出発駅と到着駅とするOD移動のみとする。ATは費用が現状のタクシー料金の-50%、待ち時間3分、自動運転バスは現状のバス料金から-50%と仮

表-3 政策前後の距離帯別の利用者数(人)

	快速列車導入前			快速列車導入後		
	電車	AT	自動運転バス	電車	AT	自動運転バス
0~5km	17050	4309	4414	16691	4471	4611
5~10km	22091	2193	319	22023	2255	326
10km以上	19115	620	0	19137	598	0
合計	58256	7122	4733	57851	7324	4937

定しLOSを設定した。

(b)シミュレーション結果

表-3は、短距離(0~5km)・中距離(5~10km)・長距離(10km以上)別に各交通機関の利用者数を算出した表である。シミュレーション結果からは、全体として利用者数が減っていることが読み取れる。短距離で自動運転バスが、中距離移動ではAT・自動運転バスが増加し、長距離移動で鉄道が利用者増加した。鉄道の速達性向上により、移動距離に応じて交通手段の差別化が図れる可能性がある。

5. まとめ

SP調査データと、タクシーのプローブデータを紐づけたH30PTによるRPデータを統合して、交通機関選択モ

デルを推定し、需要推計評価と各交通機関の利便性の特性を考察した。その知見を以下に示す。

- 1) RP/SPモデル推定より、タクシーの待ち時間>鉄道・バスの待ち時間となり、タクシーの待ち時間の変動が需要に大きく影響を与えることを示された。
- 2) 運賃割引率が大きくなるにつれ、大幅な増加を見込まれ、-40%から-60%の間でATの需要数が大幅に増加を示された。またエリア別では特に都心のターミナル駅周辺地域での利用者数が増加した。
- 3) 自動運転バスもATと同様に都心で多く増加は見られた。一方鉄道駅空地におけるバスの利用者数が増加していることを示した。
- 4) ATを活用して鉄道路線に快速列車を加えることによって、短距離移動は自動運転バス・AT、長距離移動は鉄道で増加したことから、移動距離に応じて交通手段を差別化できる可能性がある。

今後の課題を以下に示す。

- 1) 道路の容量とタクシーの供給力を考慮した需要推計を行っていない。トリップ目的も通勤・業務だけで、他のトリップ目的も加味して、道路の渋滞を考慮する必要がある。
- 2) 本需要予測モデルの欠点として、需要が定数項によって大きく左右される点が挙げられる。このため、需要の変動要因が十分に反映されない可能性があり、

定数項の修正方法についてさらなる検討が必要である。

- 3) 現在、代表交通機関のみ需要予測を行っているが、端末交通機関も含めた需要予測を行う必要がある。

REFERENCES

- 1) Ryosuke Abe: Introducing autonomous buses and taxis: Quantifying the potential benefits in Japanese transportation systems, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 126, pp.94-113, 2019.
- 2) Kentaro Mori, Tomio Miwa, Ryosuke Abe, Takayuki Morikawa : Equilibrium analysis of trip demand for autonomous taxi services in Nagoya, Japan, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol.166, pp.476-498, 2022.
- 3) Simon Oh, Ravi Seshadri, Carlos Lima Azevedo, Nishant Kumar, Kakali Basak, Moshe Ben-Akiva : Assessing the impacts of automated mobility-on-demand through agent-based simulation: A study of Singapore, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 138, pp.367-388, 2020.
- 4) 林政秀, 岩倉成志 : 自動運転タクシーの受容性に着目した選好モデルの考察, 土木学会論文集, Vol.79, No20, 2023
- 5) 佐々木邦明, 藤井聡, 山本俊行 : 交通行動の分析とモデリング, pp. 135-138, 技報堂, 2002.

(Received ?,??)

(Accepted ?,??)

TRAVEL DEMAND FORECASTING FOR THE COORDINATION OF URBAN RAILWAY WITH AUTONOMOUS TAXIS AND BUSES USING RP/SP MODE CHOICE MODEL

Keita HAGIWARA and Seiji IWAKURA