

名古屋市における自動運転タクシーサービスの 需要量に関する均衡分析

森 賢太郎¹・三好 孝晟²・三輪 富生³・安部 遼祐⁴・森川 高行⁵

¹学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: mori.kentaro@j.mbox.nagoya-u.ac.jp

²非会員 アクセンチュア株式会社

³正会員 名古屋大学准教授 未来材料・システム研究所

⁴正会員 一般財団法人 運輸総合研究所

⁵正会員 名古屋大学教授 未来社会創造機構

近年、自動運転車の普及が世界的に取り沙汰されている。特に自動運転タクシーが普及すると都市内交通需要は大きく変化すると思われ、その場合、渋滞状況や他交通手段の利用者の増減などを予測する必要がある。そのため、タクシー料金の変化や待ち時間など、包括的なサービスレベル変化を考慮した人々の交通行動の変化や交通状況の変化を明らかにすることが必要である。本研究では名古屋市内を対象とし、利用者均衡の理論に基づく分担・配分統合型交通均衡配分モデルを構築し、自動運転タクシーサービス導入シナリオの適用による効果分析を試みるものである。

Key Words: *autonomous vehicle, traffic assignment, mode choice behavior, user equilibrium*

1. はじめに

近年、自動運転の普及が世界的に取り沙汰されおり、特に自動運転車を無人タクシーとして運用することが期待されている。ボストン・コンサルティング・グループの調査¹⁾では、自動運転タクシーが先進国の都市部に交通革命を起こす可能性が指摘され、利用料金は現在のタクシーよりも25~35%安くなると予測されている。

一方、人口集積地域である大都市において、住民の主要な交通手段である地下鉄は、開業から長期にわたって累積化損金を抱えていることが多く、自動運転の普及は経営的な視点から無視できない。自動運転により従来と比べタクシー料金が安くなると、現在の地下鉄の利用者が交通手段を自動運転タクシーに変更することが考えられる。しかし、その一方で、従来の交通システムでは地下鉄駅までの交通手段が確保されていなかった人々が、自動運転タクシーを利用して地下鉄駅までのアクセスを容易とすることも考えられる。

このように、自動運転タクシーの普及による地下鉄の利用者の増減を予測することは重要である。以上から、自動運転タクシーの普及を仮定し、その利用料金の変化や、道路網上の自動車交通量の変化に伴う混雑の増加など、より包括的なサービスレベルの変化を考慮した、

人々の交通行動の変化や交通状況の変化を明らかにすることが必要である。

シミュレーションモデルを用いた自動運転の普及可能性についての研究は、山本ら²⁾や上条ら³⁾により行われている。しかし、シミュレーションモデルでは、交通手段選択と交通混雑のような、道路上の交通混雑を介した相互作用による均衡状態を考慮するのが困難である。そのため、本研究では、交通手段選択を内生化した利用者均衡配分理論を適用し、名古屋市を対象にして自動運転タクシーサービスの導入評価を行う。

2. 交通手段選択行動を考慮した交通均衡モデル

(1) 交通手段選択の表現

本研究では、代表交通手段として、鉄道、バス、タクシー（もしくは自動運転タクシー）、自動車、自転車、そして徒歩の6手段を考慮する。また、自動運転タクシーは鉄道へのアクセス交通手段として使用してされることも見込まれることから、鉄道へのアクセス手段を考慮した交通手段選択モデルの構築が必要となる。このため、本研究では、交通手段選択行動を図-1に示すようなネステッドロジットモデルで表現する。また、代表交通手

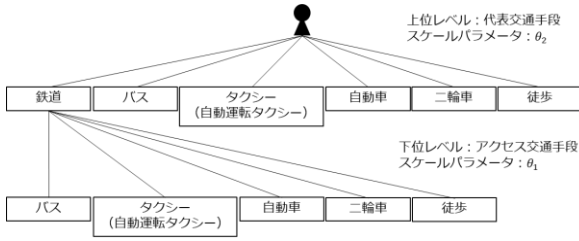


図-1 交通手段選択モデルの構造

段の選択を上位レベル，鉄道利用時のアクセス交通手段の選択を下位レベルと呼ぶこととする。

(2) 交通手段選択モデル

交通手段選択を表現するネステッドロジットモデルは以下ようになる。すなわち，鉄道駅までのアクセスに交通手段 j を利用する確率 $P(j|rail)$ ，代表交通手段として鉄道以外の交通手段 i を利用する確率 $P(i)$ ，および代表交通手段として鉄道を利用する確率 $P(rail)$ は以下のように表される。

【下位レベル】

$$P(j|rail) = \frac{\exp\{\theta_1(-\beta_t c_{rs,j}^{ac} + d_{rs,j}^{ac})\}}{\sum_{j' \in J} \exp\{\theta_1(-\beta_t c_{rs,j'}^{ac} + d_{rs,j'}^{ac})\}} \quad (1)$$

【上位レベル】

$$P(i) = \frac{\exp\{\theta_2(-\beta_t c_{rs,i} + d_{rs,i})\}}{\left(\sum_{i' \in I} \exp\{\theta_2(-\beta_t c_{rs,i'} + d_{rs,i'})\} + \exp\{\theta_2(-\beta_t c_{rs,rail} + d_{rs,rail} + LS_{rs}^{rail})\} \right)} \quad (2)$$

$$P(rail) = \frac{\exp\{\theta_2(-\beta_t c_{rs,rail} + d_{rs,rail} + LS_{rs}^{rail})\}}{\left(\sum_{i' \in I} \exp\{\theta_2(-\beta_t c_{rs,i'} + d_{rs,i'})\} + \exp\{\theta_2(-\beta_t c_{rs,rail} + d_{rs,rail} + LS_{rs}^{rail})\} \right)} \quad (3.a)$$

$$LS_{rs}^{rail} = \frac{1}{\theta_1} \ln \left[\sum_{j' \in J} \exp\{\theta_1(-\beta_t c_{rs,j'}^{ac} + d_{rs,j'}^{ac})\} \right] \quad (3.b)$$

ここに，OD ペア rs について， $c_{rs,j}^{ac}$ は鉄道利用のアクセス交通手段 j を利用する際のアクセス区間での一般化費用， $c_{rs,i}$ は代表交通手段 i （鉄道以外）の一般化費用， $c_{rs,rail}$ は鉄道を利用する際の最初の乗車駅以降の一般化費用， LS_{rs}^{rail} は代表交通手段が鉄道の際のアクセス手段選択に関する期待最大効用（ログサム変数）， $d_{rs,j}^{ac}$ はアクセス交通手段 j の定数項， $d_{rs,i}$ は代表交通手段 i （鉄道以外）の定数項， $d_{rs,rail}$ は鉄道の定数項， θ_1 ， θ_2 はそれぞれ下位レベル（アクセス交通手段の選択），上位レベル（代表交通手段の選択）のスケールパラメータ， $-\beta_t$ は一般化費用のパラメータである。また，一般化費用は以下のように定義する。

$$c_{rs,j}^{ac} = time_{rs,j}^{ac} + \frac{\beta_c}{\beta_t} cost_{rs,j}^{ac} \quad (4)$$

$$c_{rs,i} = time_{rs,i} + \frac{\beta_c}{\beta_t} cost_{rs,i} \quad (5)$$

$$c_{rs,rail} = time_{rs,rail} + \frac{\beta_c}{\beta_t} cost_{rs,rail} \quad (6)$$

ここに， $time$ は旅行時間， $cost$ は料金， β_c は料金のパラメータである。

(3) 等価数理最適化問題

(2) で示した交通手段選択モデルを内生化した均衡配分モデルは，以下の式(7)によって等価推理最適問題として表せる。

$$\begin{aligned} \min. Z = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw + \frac{1}{\theta_2} \sum_{rs} \sum_i \frac{1}{\beta_t} q_{rs,i} \ln \frac{q_{rs,i}}{Q_{rs}} \\ & + \frac{1}{\theta_2} \sum_{rs} \frac{1}{\beta_t} q_{rs,rail} \ln \frac{q_{rs,rail}}{Q_{rs}} + \frac{1}{\theta_2} \sum_{rs} \frac{1}{\beta_t} q_{rs,car} \ln \frac{q_{rs,car}}{Q_{rs}} \\ & + \frac{1}{\theta_2} \sum_{rs} \frac{1}{\beta_t} q_{rs,taxi} \ln \frac{q_{rs,taxi}}{Q_{rs}} - \sum_{rs} \sum_i q_{rs,i} \left(\frac{d_{rs,i}}{\beta_t} - c_{rs,i} \right) \\ & - \sum_{rs} q_{rs,rail} \left(\frac{d_{rs,rail}}{\beta_t} - c_{rs,rail} \right) - \sum_{rs} \frac{q_{rs,car}}{\beta_t} d_{rs,car} \\ & - \sum_{rs} \frac{q_{rs,taxi}}{\beta_t} (d_{rs,taxi} - \beta_c cost_{rs,taxi}) \\ & + \frac{1}{\theta_1} \sum_{rs} \sum_j \frac{1}{\beta_t} q_{rs,j}^{ac} \ln \frac{q_{rs,j}^{ac}}{q_{rs,rail}} + \frac{1}{\theta_1} \sum_{rs} \frac{1}{\beta_t} q_{rs,car}^{ac} \ln \frac{q_{rs,car}^{ac}}{q_{rs,rail}} \\ & + \frac{1}{\theta_1} \sum_{rs} \frac{1}{\beta_t} q_{rs,taxi}^{ac} \ln \frac{q_{rs,taxi}^{ac}}{q_{rs,rail}} \\ & - \sum_{rs} \sum_j q_{rs,j}^{ac} \left(\frac{d_{rs,j}^{ac}}{\beta_t} - c_{rs,j}^{ac} \right) - \sum_{rs} \frac{q_{rs,car}^{ac}}{\beta_t} d_{rs,car}^{ac} \\ & - \sum_{rs} \frac{q_{rs,taxi}^{ac}}{\beta_t} (d_{rs,taxi}^{ac} - \beta_c cost_{rs,taxi}^{ac}) \end{aligned} \quad (7.a)$$

Subject to

$$\sum_i q_{rs,i} + q_{rs,rail} + q_{rs,car} + q_{rs,taxi} = Q_{rs} \quad \forall rs \quad (7.b)$$

$$\sum_j q_{rs,j}^{ac} + q_{rs,car}^{ac} + q_{rs,taxi}^{ac} = q_{rs,rail} \quad \forall rs \quad (7.c)$$

$$\sum_{k_{car}} f_{rs,k_{car}}^{car} = q_{rs,car} \quad \forall rs \quad (7.d)$$

$$\sum_{k_{taxi}} f_{rs,k_{taxi}}^{taxi} = q_{rs,taxi} \quad \forall rs \quad (7.e)$$

$$\sum_{k'_{car}} f_{rs,k'_{car}}^{ac,car} = q_{rs,car}^{ac} \quad \forall rs \quad (7.f)$$

$$\sum_{k_{taxi}} f_{rs,k'_{taxi}}^{ac,taxi} = q_{rs,taxi}^{ac} \quad \forall rs \quad (7.g)$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_{k_{car}} \delta_{a,k_{car}}^{rs} f_{rs,k_{car}}^{car} + \sum_{rs} \sum_{k_{taxi}} \delta_{a,k_{taxi}}^{rs} f_{rs,k_{taxi}}^{taxi} + \sum_{rs} \sum_{k'_{car}} \delta_{a,k'_{car}}^{rs} f_{rs,k'_{car}}^{ac,car} + \sum_{rs} \sum_{k'_{taxi}} \delta_{a,k'_{taxi}}^{rs} f_{rs,k'_{taxi}}^{ac,taxi} \quad \forall a \quad (7.h)$$

$$x_a \geq 0, q_{rs,i} \geq 0, q_{rs,rail} \geq 0, q_{rs,car} \geq 0, q_{rs,taxi} \geq 0, q_{rs,j}^{ac} \geq 0, q_{rs,car}^{ac} \geq 0, q_{rs,car}^{ac} \geq 0, f_{rs,k_{car}}^{car} \geq 0, f_{rs,k_{taxi}}^{taxi} \geq 0, f_{rs,k'_{car}}^{ac,car} \geq 0, f_{rs,k'_{taxi}}^{ac,taxi} \geq 0 \quad (7.i)$$

ここに、 x_a はリンク a の交通量、 $t_a(\cdot)$ はリンクコスト関数である。また、OD ペア rs について、 Q_{rs} は OD 交通量、 $q_{rs,i}$ 、 $q_{rs,rail}$ 、 $q_{rs,car}$ 、 $q_{rs,taxi}$ はそれぞれ代表交通手段として i (目的関数においては、鉄道、自動車、タクシー以外)、鉄道、自動車、タクシーを選択した交通量、 $q_{rs,j}^{ac}$ 、 $q_{rs,car}^{ac}$ 、 $q_{rs,taxi}^{ac}$ はそれぞれ代表交通手段が鉄道でアクセス交通手段として j (目的関数では、自動車、タクシー以外)、自動車、タクシーを選択した交通量、 $f_{rs,k_{car}}^{car}$ 、 $f_{rs,k_{taxi}}^{taxi}$ はそれぞれ代表交通手段として自動車、タクシーを選択した経路 k_{car} 、 k_{taxi} の交通量、 $f_{rs,k'_{car}}^{ac,car}$ 、 $f_{rs,k'_{taxi}}^{ac,taxi}$ はそれぞれ代表交通手段が鉄道でアクセス交通手段として自動車、タクシーを選択した経路 k'_{car} 、 k'_{taxi} の交通量、 $\delta_{a,k_{car}}^{rs}$ 、 $\delta_{a,k_{taxi}}^{rs}$ 、 $\delta_{a,k'_{car}}^{rs}$ 、 $\delta_{a,k'_{taxi}}^{rs}$ は各経路がリンク a を利用するとき 1 となる変数である。

ここで、目的関数と制約条件からラグランジュ関数を定義し、Kuhn-Tucker 条件から均衡解の最適性条件を求めると、均衡解の最適性条件として式(1)~(3)が得られる。

本研究においては Frank-Wolf 法を用いてここで示した数理最適化問題を解く。

3. 交通手段選択モデルの構築

(1) モデル構築の手順

本研究では、実在しない自動運転タクシーの交通需要を予測することを目的としており、観測データから交通手段モデルを構築できない。そのため、森川ら⁴⁾によって提案された RP データと SP データを同時に用いた非集計行動モデル (RP/SP モデル) の推定手法を応用する。

(2) RP モデル

RP モデルは図-1 に示したツリー構造を有するネステ

ッドロジットモデルである。使用するデータは、平成 23 年に行われた第 5 回中京都市圏パーソントリップ調査のデータ (PT データ) である。本研究では、この PT データから、名古屋市内のトリップのみを抽出してモデル構築に用いる。さらに、対象時間帯は 7 時台から 18 時台までとし、18 歳未満によるトリップおよび同じ小ゾーン内のトリップは除外する。

本研究では、この対象データのうち 884 サンプルを用いる。利用交通手段に関する母集団シェアとサンプルシェアを表-1 に示す。母集団ではタクシーの選択割合が非常に低いため、無作為に抽出したデータでは、タクシー利用者がほとんど含まれない。このため、できるだけ多くのタクシー利用データを抽出し、その他の交通手段利用データはランダムに抽出した。このような抽出方法により、サンプルシェアと母集団シェアが一致しないため、本研究では表-1 に示した母集団シェアを用いた WESML 推定法を適用する。

抽出されたトリップデータの旅行時間と料金を含む LOS データは Google Maps により手作業により作成した。さらに、徒歩と自転車の旅行時間がある上限値より長い場合は選択肢から除外した。この旅行時間の上限値は、代表交通手段の場合、徒歩および自転車を実際に用いたトリップの LOS データの 98 パーセントイルとした。また、アクセス手段の場合は、代表交通手段と比べ旅行時間のばらつきが少なく、外れ値がないため、実際にアクセス手段として徒歩および自転車を用いたトリップの LOS データの最大値までを許容範囲とした。

本研究で構築した交通手段選択モデルには、配分計算を容易にするため、所要時間と料金のみを説明変数として用いている。RP モデルのパラメータ推定結果を表-2 に示す。

本研究では、Carrasco ら⁵⁾を参考に上位レベルのスケールパラメータ θ_2 を 1 に基準化している。推定結果から計算される時間価値が 271 円/分となり、一般に用いられ

表-1 母集団シェアとサンプルシェア

交通手段	母集団シェア	サンプルシェア
<鉄道駅へのアクセス交通手段>		
バス	0.103	0.100
タクシー	0.001	0.036
自動車	0.017	0.080
自転車	0.088	0.080
徒歩	0.791	0.703
<代表交通手段>		
鉄道	0.256	0.282
バス	0.048	0.057
タクシー	0.008	0.028
自動車	0.452	0.396
自転車	0.156	0.153
徒歩	0.080	0.085

表-2 RPモデルのパラメータ推定結果 (WESML推定)

説明変数	推定値	(t 値)
<鉄道駅へのアクセス交通手段>		
定数項 バス	-0.788	(-5.22)
自動車	-1.865	(-7.34)
タクシー	-2.731	(-6.84)
自転車	-1.074	(-6.80)
徒歩	0	(-)
下位スケールパラメータ θ_1	3.116	(4.56 [†])
<代表交通手段>		
定数項 鉄道	1.048	(7.11)
バス	-0.940	(-5.57)
自動車	0.328	(1.92)
タクシー	-3.365	(-20.86)
自転車	-0.288	(-1.78)
徒歩	0	(-)
共通		
所要時間 (時間)	-2.362	(-7.54)
料金 (1000 円)	-0.145	(-2.85)
サンプルサイズ	884	
初期尤度	-1759.6	
最終尤度	-1154.0	
決定係数	0.344	
修正決定係数	0.337	

[†]1.0 との有意差に関する t 値

る値 (40~70 円/分) より高くなっている。この理由には、通勤や業務トリップでは、交通費が勤務先企業から支払われる場合、費用に関する感度が低くなること、作成したデータの精度が十分でなかったことなどが考えられる。

(3) SPモデル

本研究で使用する SP データは、愛知県、岐阜県、三重県を対象として、2019年3月15日~24日に Web 調査によって得た。調査では、ある設定されたサービスレベルを有する自動運転タクシーが利用可能な場合に、普段の通勤手段をやめて自動運転タクシーを利用して通勤するかを質問している。また、普段、鉄道を利用して通勤している場合のみ、通勤移動中のどの区間で自動運転タクシーを利用するかを質問している (その他の交通手段では、起終点間で自動運転タクシーを利用すると想定している)。このため、普段の通勤手段によって、モデル構造が異なる。すなわち、回答者が鉄道を利用している場合は図-2、鉄道以外の交通手段を利用している場合は図-3で選択構造を表現できる。なお、鉄道を利用している被験者が、イグレス区間で自動運転タクシーを利用すると回答したケースはなかった。ここで、RP データでは昼間 12 時間のデータである理由は、PT データにおいてタクシー利用トリップが通勤時間帯に存在しなかったためである。このため、SP データとのトリップ目的の違いは今後の課題である。

アンケート調査では、自動運転タクシーのサービスを

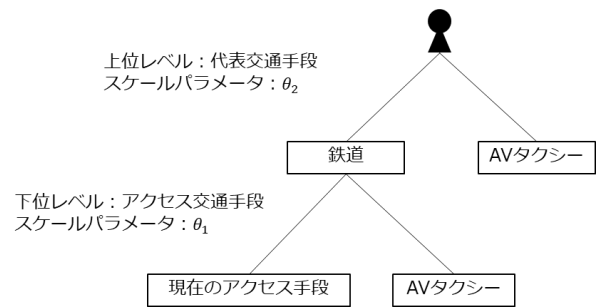


図-2 鉄道を利用している場合の選択構造

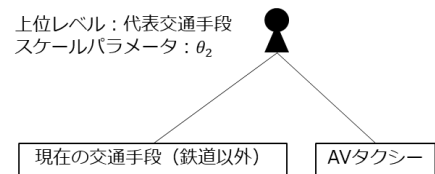


図-3 鉄道以外を利用している場合の選択構造

以下に示す 7 つの要因で表現し、3 水準直交表により 27 パターンの組み合わせを設定した。

- A) 普及率 (既に通勤で自動運転車によるタクシーサービスを利用している人の割合) (2, 20, 60%)
- B) 普及開始からの年数 (0, 3, 10年)
- C) 予定した出発時刻に自動運転タクシーが遅れる時間 (平均) (0, 2, 5分)
- D) 予定した出発時刻に自動運転タクシーが遅れる時間 (1カ月に1度程度の大きな遅れ) (1, 5, 15分)
- E) 移動中の走行速度 (20, 40, 80km/h)
- F) 移動費用 (100, 200, 400円/km)
- G) 他の乗客と同乗する割合 (10, 50, 80%)

自動運転タクシーの利用意向については 13%の被験者が「利用する」、87%が「利用しない」と回答した。また、「利用する」と回答した被験者のうち、44%は「通勤の一部で利用」、56%は「すべての区間で利用」と回答した。SPモデルで最終的に採用した要因の変化に対する回答の変化を図-4~図-6に示す。どの項目でも、「使用する」回答割合に明確な傾向は見えないことから、本アンケートでは期待した反応を得ることができておらず、実在せずイメージが難しい交通サービスに対する調査は容易でないことが分かる。

SPモデルのパラメータ推定結果を表-3に示す。RPモデルの推定では徒歩の定数項を0としたが、SPモデルの推定では自動運転タクシーの定数項を0とした。これは、図-2、図-3からも分かるように、各サンプルで選択肢集合は異なり、自動運転タクシーのみが常に選択肢として含まれているためである。また、上位レベルのスケールパラメータ θ_2' を1とし、下位レベルのスケールパラメータ θ_1' を推定している。

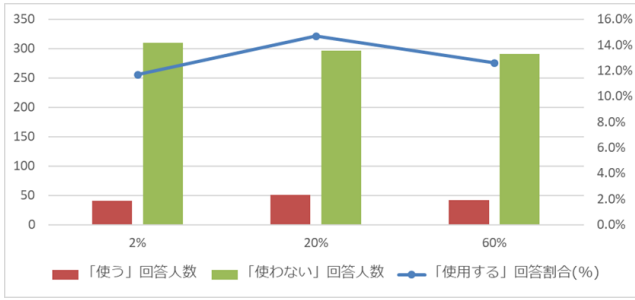


図-4 自動運転タクシー普及率

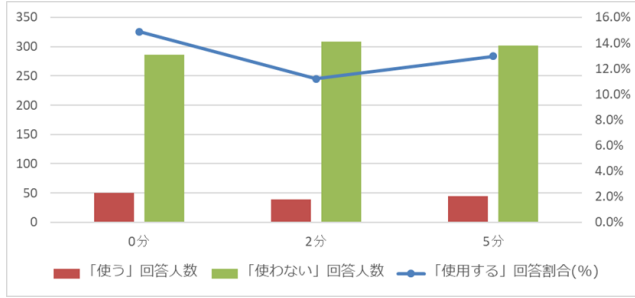


図-5 予定出発時刻に遅れる時間 (平均)

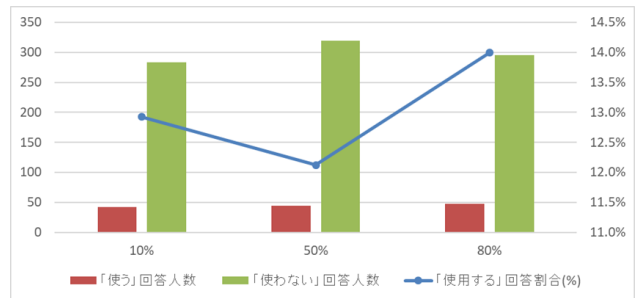


図-6 他の乗客と同乗する割合

SP 調査では、自動運転タクシーサービスに関する変数について、走行速度と料金以外に 5 つの特徴（普及率、普及開始からの年数、平均出発遅れ時間、最大出発遅れ時間、他社との同乗率）を示しているが、期待される符号条件（それぞれ、正、正、負、負、負）を満たさないものはモデルから除外した。この結果、アクセス手段としては、普及率と平均出発遅れ時間のみ、代表交通手段としては他社との同乗率のみを、説明変数として残している。しかし、いずれも統計的に有意なパラメータが得られておらず、ここからもアンケートデータの精度の低さがうかがわれる。

モデルの適合度が非常に高いが、これは選択肢数が少ないためである。時間価値は 203 円/分と、RP モデルと比べてやや一般的な時間価値に近づいた。

(4) RP/SP モデル

RP/SP モデルは RP モデルと SP モデルを組み合わせたモデルであり、パラメータ推定においては所要時間と料

表-3 SPモデルのパラメータ推定結果（最尤推定）

説明変数	推定値	(t 値)
＜鉄道駅へのアクセス交通手段＞		
定数項 バス	0.649	(1.17)
自動車	1.154	(1.09)
自転車	0.629	(1.09)
徒歩	0.932	(1.19)
自動運転 タクシー	0	(-)
自動運転タクシー変数 普及率 (%)	0.004	(0.72)
平均出発遅れ時間 (分)	-0.136	(-1.04)
下位スケールパラメータ θ'_1	2.725	(0.71 [†])
＜代表交通手段＞		
定数項 鉄道	1.414	(1.81)
バス	1.067	(1.91)
自動車	1.949	(8.40)
自転車	1.776	(4.35)
徒歩	-	(-)
自動運転 タクシー	0	(-)
自動運転タクシー変数 他者との同乗率 (%)	-0.001	(-0.31)
共通		
所要時間 (時間)	-0.616	(-2.20)
料金 (1000 円)	-0.0506	(-1.46)
サンプルサイズ	1,022	
初期尤度	-835.3	
最終尤度	-415.6	
決定係数	0.502	
修正決定係数	0.486	

[†] 1.0 との有意差に関する t 値

金のパラメータを共有する。上位と下位のスケールパラメータの比は RP と SP で等しいと仮定する。すなわち、SP モデルと RP モデルでのスケールパラメータの比をどちらも θ' として、式(8)の関係を仮定する。

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{\theta'_2}{\theta'_1} = \frac{\theta'_2 \theta_1}{\theta'_1 \theta_2} \quad (8)$$

有意ではない自動運転タクシーサービスの特徴に関するパラメータは除いた RP/SP モデルのパラメータ推定結果を表-4 に示す。ここでも WESML 推定を適用しているが、SP データに対する重みは 1 としている。

表中に示されるパラメータ推定値のうち、定数項は RP データに適用されている値を、自動運転タクシーのサービスレベル（平均出発遅れ（分）のみ）は SP データに適用されている値を、下位スケールパラメータや所要時間、料金は共通の推定値を、交通量配分モデルに適用する。なお、将来需要量を予測し、交通均衡配分モデルに適用するためには、自動運転タクシーについての選択肢固有定数項が必要である。RP/SP モデルにおいては、RP モデルの定数項と SP データの定数項をシェアするこ

表-4 RP/SP モデルのパラメータ推定結果 (WESML 推定)

説明変数	RP データ			SP データ		
	推定値	(t 値)		推定値	(t 値)	
< 鉄道駅へのアクセス交通手段 >						
定数項 バス	-0.780	(-4.53)	**	1.856	(2.09)	*
自動車	-1.862	(-5.08)	**	3.463	(1.72)	(*)
タクシー (自動運転タクシー)	-2.696	(-2.67)	**	—	(—)	—
自転車	-1.072	(-5.20)	**	1.673	(1.88)	(*)
徒歩	0	(—)	—	2.811	(2.13)	*
自動運転タクシー 平均出発遅れ (分)	—	(—)	—	-0.442	(-1.67)	(*)
下位スケールパラメータ	3.119			(2.91 [†]) **		
< 代表交通手段 >						
定数項 鉄道	1.056	(6.89)	**	6.237	(2.29)	*
バス	-0.932	(-4.70)	**	4.247	(1.68)	(*)
自動車	0.304	(1.79)	(*)	7.536	(2.42)	*
タクシー (自動運転タクシー)	-3.330	(-7.06)	**	—	(—)	—
自転車	-0.285	(-1.59)		6.880	(2.29)	*
徒歩	0	(—)	—	—	(—)	—
SP スケール θ'	—	(—)	—	0.267	(2.39)	*
共通						
所要時間 (時間)	-2.353			(-6.93) **		
料金 (1000 円)	-0.175			(-1.44)		
サンプルサイズ	1906					
初期尤度	-2594.9					
最終尤度	-1646.5					
決定係数	0.395					
修正決定係数	0.390					

[†]1.0 との有意差に関する t 値 *1%有意, *5%有意, (*)10%有意

とで、自動運転タクシーの定数項も推定できるが⁹⁾、前述の通り、収集した SP データはさらなる詳細な調査が必要であるため、本研究では RP データのうち、最も自動運転タクシーにサービスが類似したタクシーの定数項を、自動運転タクシーの定数項として用いることとする。

4. 配分データと定数項の修正

(1) 本研究で用いるデータ

本研究では、名古屋市内のトリップのみを対象として、分担・配分統合型交通均衡配分モデルを適用する。ゾーニングはパーソントリップ調査の基本ゾーンとし、名古屋市内についての 127 ゾーンである。

名古屋市内の OD データは PT データのトリップに拡大係数を乗じて作成した。名古屋市内への流入・流出交通量や通過交通量は、H17 道路交通センサスオーナーマスター調査データから 7:00~18:59 に出発したトリップのうち、名古屋市内々以外のトリップを集計し、これを前もって配分しておくこととした。道路ネットワークデー

タは中部地方整備局管内を対象とした H32 配分ネットワークを用い、リンク数 32,452 (両方向)、ノード数 11,384 である。

リンクパフォーマンス関数は BPR 関数とし、式(9.a)のように土木学会による標準パラメータを用いている。また、通常は 1 時間単位のリンクパフォーマンス関数を、研究の対象とする時間帯幅に対応した関数にするために、溝上ら⁷⁾の手法を用い、H27 道路交通センサスの交通量調査データを基に、道路種類別に換算係数 γ_a を算出した。本研究では道路種類は高速道路と一般道路のみとし、換算係数を表-5 に示す。

$$t_a(x_a) = t_{a0} + 0.48 \left(\frac{Q_a}{\gamma_a C_a} \right)^{2.82} \quad (9.a)$$

$$Q_a = \sum_{i=7}^{18} q_{ai} \quad (9.b)$$

表-5 道路種類別 12 時間換算係数

道路種類	換算係数 γ_a
高速道路	10.52
一般道路	11.31

$$\gamma_a = \left(\sum_{i=7}^{18} \left(\frac{q_{ai}}{Q_a} \right)^{1+2.82} \right)^{-\frac{1}{2.82}} \quad (9.c)$$

ここに、リンク a について、 t_{a0} は自由走行時間、 C_a は時間可能交通容量、 q_{ai} は時間帯 i の交通量、 Q_a は対象時間帯の交通量である。

本研究では、自動車及び自動運転タクシーのみを道路ネットワークへの配分対象としている。それ以外の交通手段の LOS データは、公共交通機関（鉄道、バス）利用区間は、H27 時点のマストラネットワークデータから作成した。また、自転車および徒歩を利用する区間については、GoogleDirectionsAPI から情報を取得した。ここで、バスは混雑状況から影響を受けないことを仮定しており、この仮定の緩和は今後の課題である。また、ドライバーが運転する現在のタクシーはすべて自動運転タクシーに置き換わることを想定している。

(2) 定数項の修正

表-4 のパラメータ推定結果を用い、均衡配分を行っても、PT データの交通手段シェアと均衡配分結果が一致しない。これは、交通手段選択モデル推定用データにおける LOS と配分によって再現される LOS が一致しないためであり、特に、自動車やタクシー利用時の旅行時間の差異が大きいためである。このため、交通手段シェアが一致するように、選択肢固有定数項を簡便法により修正した⁹⁾。この方法は、本来は多項ロジットモデルに適用するものであるが、ネスティッドロジットモデルの上位および下位レベルがそれぞれに対して、以下のように交互に適用した。

まず、上位レベルの定数項の修正には、一般に用いられる通り、式(10)を用いた。

$$\hat{\beta}'_j = \hat{\beta}_j - \ln \left(\frac{H_j}{Q_j} \right) \quad (10)$$

ここに、選択肢 j について、 $\hat{\beta}'_j$ と $\hat{\beta}_j$ はそれぞれ修正後と修正前の選択肢固有定数項、 H_j は配分の結果得られたシェア、 Q_j は母集団シェアである。

次に、下位レベルの修正には式(11)のように行った。

$$\hat{\beta}'_j = \hat{\beta}_j - \zeta \ln \left(\frac{H_j}{Q_j} \right) + \ln \left[\sum_j \exp(\beta_j^0) \right] - \ln \left[\sum_j \exp \left\{ \hat{\beta}_j - \zeta \ln \left(\frac{H_j}{Q_j} \right) \right\} \right] \quad (11)$$

ここに、 β_j^0 は表-4 に示した RP/SP モデルで推定された選択肢固有定数項であり、 ζ は修正幅を調整する係数である。この式は、下位レベルの定数項を修正することによって生じる、ログサム変数値の変化を簡易的に元に戻す

表-6 定数項修正結果

説明変数	修正後
<鉄道駅へのアクセス交通手段>	
定数項 バス	-0.348
自動車	-1.748
自動運転タクシー	-2.761
自転車	-1.164
徒歩	-0.264
<代表交通手段>	
定数項 鉄道	1.362
バス	-0.617
自動車	0.996
自動運転タクシー	-2.891
自転車	-0.440
徒歩	0

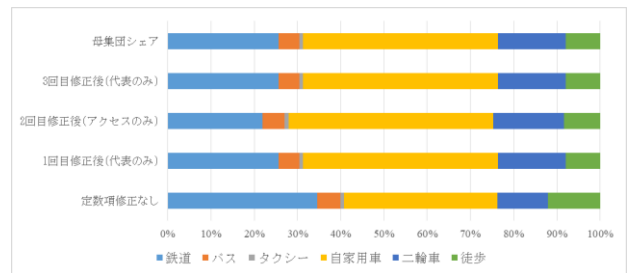


図-7 定数項修正による代表交通手段シェアの変化

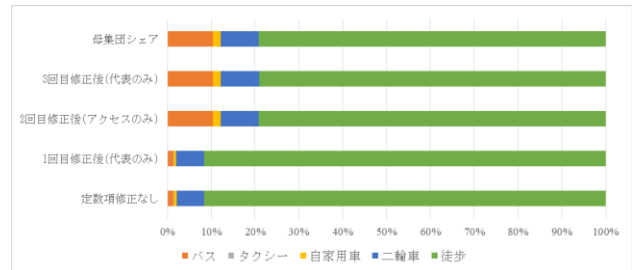


図-8 定数項修正によるアクセス交通手段シェアの変化

ことを意図している。下位レベルの定数項を式(10)によって修正すると、上位レベルで計算されるログサム変数の値が大きく変化してしまい、上位レベルでのシェアが変わってしまう。そこで、式(11)の右辺第 3 項と第 4 項は、下位レベルの定数項の修正によって生じるログサム変数の近似的変化量を引いている。定数項以外の効用値も考慮すればより適切に修正できると考えられるが、簡単のため省略した。また、1 度に大きな変化を与えると収束しなかったため、修正幅を調整する係数 (ζ) を導入し、ここでは 0.25 に設定した。

修正は配分計算とともに上位レベルを先に 5 回行い、次いで下位レベルを 5 回行った。さらに上位レベルを 5 回行ったところで、上位レベル・下位レベルの両方でシェアが母集団に近くなり収束したことを確認した (図-7 および図-8)。また、修正後の選択肢固有定数項を表-6 に示す。

5. 政策分析

(1) 自動運転車導入のシナリオ

本研究では、自動運転タクシー（以降では、AV タクシーとする）が導入された場合の需要量を、現在のタクシー料金からの割引率、専用レーンの敷設、および AV タクシーが出発予定時刻からどの程度遅れるかという平均遅れ時間（分）で表現する。

現在のタクシーの料金からの割引率は、-25%、-50%、-75%の3パターンを設定した。専用レーンの敷設エリアについては、名古屋市内全域、名古屋市都心部、名古屋市郊外部の3パターンを想定して分析を行う。ここで、名古屋市都心部とは、図-9に示すように栄交差点から半径3km以内とし、名古屋市の中での郊外部とは半径3km以外とした。平均遅れ時間（分）については、1分、3分、5分を想定して分析を行う。

(2) 料金感度の分析

料金感度の分析は、平均遅れ時間（分）を0分、専用レーンの敷設はないものとして行う。図-10に、現況タクシーからの料金の割引率を-0%、-25%、-50%、-75%と変化させた場合のAVタクシー利用トリップ数の変化を、図-11に、AVタクシーの走行台キロと走行台時の変化を示す。利用料金の変化によるAVタクシー利用トリップ数の増加率より走行台キロや走行台時の増加率の方が高い。道路網上の総走行台キロ・台時はほとんど変化がなかったことから、より長距離で利用されるようになることが分かる。

(3) 出発遅れ時間の影響

本研究では、ボストン・コンサルティング・グループの調査¹⁾の結果から、現況タクシーからの料金の割引率を-25%として出発遅れ時間の影響を分析する。自動運転タクシーの平均出発遅れ時間（分）のパラメータは、

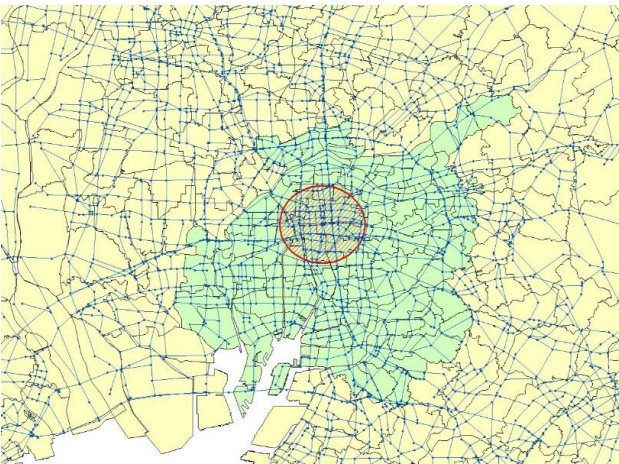


図-9 設定した名古屋市都心部（図中赤丸）

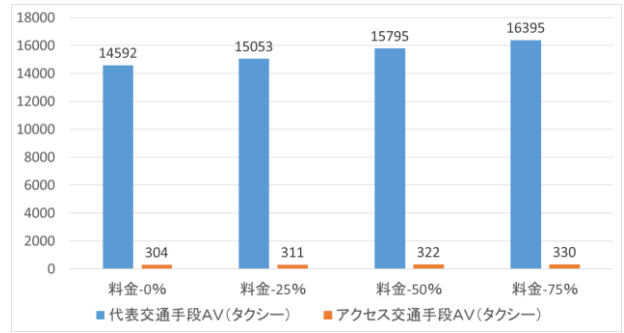


図-10 料金割引とAVタクシー利用トリップ数

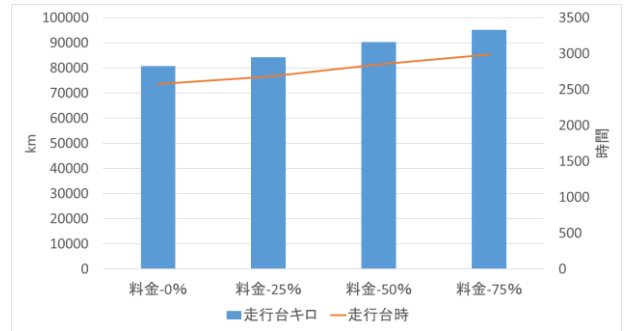


図-11 料金割引とAVタクシーの走行台キロ・走行台時

鉄道駅へのアクセス交通手段においてのみ有意となっているため、アクセス交通手段としてAVを使用する場合のみを考慮する。図-12に、出発遅れ時間を0分、1分、3分、5分と変化させた場合の、AVタクシーによる鉄道アクセストリップの変化を示す。出発遅れ時間を増やすごとに、大幅にアクセス交通手段AVの総トリップ数が減少している。出発時刻が平均で1分遅れるだけでも、AVタクシーの需要が大きく減少することから、AVタクシーを普及させるためには、利用者の希望出発時刻までに利用者の出発地点まで到着させるような、配車配送計画が重要であることが分かる。

(4) AVタクシー専用レーンの設定について

本研究では、AVタクシーのみが走行可能な専用レーンの敷設を仮定して分析を行う。専用レーン敷設対象エリアのうち、片側2車線以上あるすべての道路リンクで、片側1車線を専用レーンとする。また、本研究では、AVタクシー専用レーンでは、自動運転車の速度が高く設定できると考え、その自由走行速度を、元のリンクの自由走行速度から20km/hを上昇できると仮定する。また、AV専用レーンの交通容量は、Friedrich⁹⁾に従い、式(12)を用いて計算される、元のリンク交通容量からの増加率によって算出する。

$$C_a/C_h = (v_h T_h + L)/(v_a T_a + L) \quad (12)$$

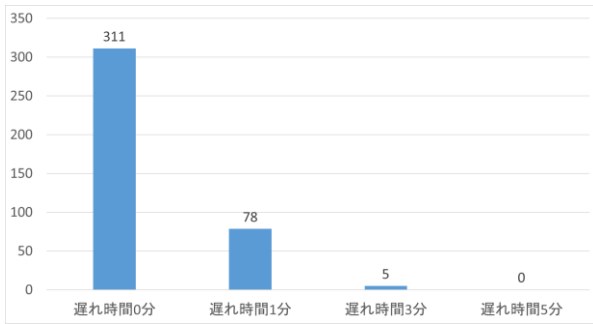


図-12 アクセス交通手段 AV の総トリップ数

ここに、 C_a 、 C_h はそれぞれ自動運転車、手動運転車の交通容量、 v_a 、 v_h はそれぞれ自動運転車、手動運転車の速度、 T_a 、 T_h はそれぞれ自動運転車、手動運転車の反応遅れ、 L は車長と安全距離の合計である。本研究では、Friedrich⁹⁾に従い、手動運転車の反応遅れを 1.15 秒、自動運転車の反応遅れを 0.5 秒としている。また、車長と安全距離の合計は 7.5m としている。

(5) AV 専用レーン敷設による効果分析

本研究では、現在のタクシーからの料金の割引率を -25%、AV タクシーの平均出発遅れ時間 (分) を 0 分とし、専用レーンの設置効果の分析を行う。図-13~図-15 に専用レーンの敷設エリアを変えた場合の総トリップ数、走行台キロ、走行台時を示す。図-13 より、AV タクシー専用レーン敷設の対象エリアが広がるにつれて代表交通手段として AV タクシーを使用するトリップ数が増加することが分かる。これは、専用レーンの敷設によって走行速度が上がり、渋滞による速度低下の影響も低減されるためである。ただし、アクセス手段としての効果は限定的である。図-14 から分かる通り、AV タクシー専用レーンの敷設エリアが拡大するにつれ、より多くの AV タクシーが専用レーンを走るようになる。その一方で、図-15 では、走行台キロの減少と走行台時の増加が見られ、普通車レーンでは渋滞状況が悪化し、平均速度が低下していることが読み取れる。

そこで、AV タクシー専用レーン設置エリアごとに計算した、各リンクの混雑度を図-16~図-19 に示す。ただし、図中のリンクは混雑度 (=リンク交通量/交通容量) に従って色分けされており、1 を超えるリンクは赤く色分けされ、渋滞していると考えることができる。図-16 より、専用レーンの敷設がない場合でも、名古屋高速都心環状線が渋滞していることが分かる。図-17 より、専用レーンを都心部に敷設した場合、名古屋高速都心環状線や名古屋高速 2 号東山線などの都心部の主要道路に渋滞の悪化が見られる。図-18 より、AV タクシー専用レーンを郊外部に敷設した場合、都心部の渋滞は若干軽減されるものの、東山トンネルをはじめ、郊外部で幅広く渋

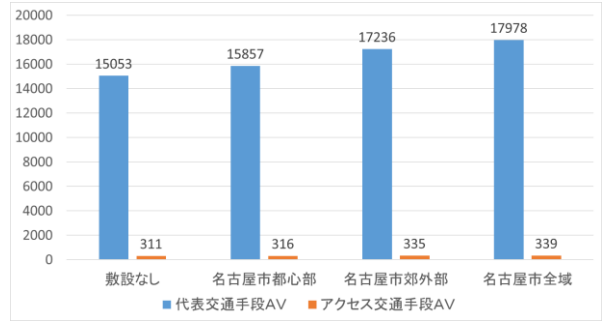


図-13 専用レーン敷設と AV タクシートリップ数の変化

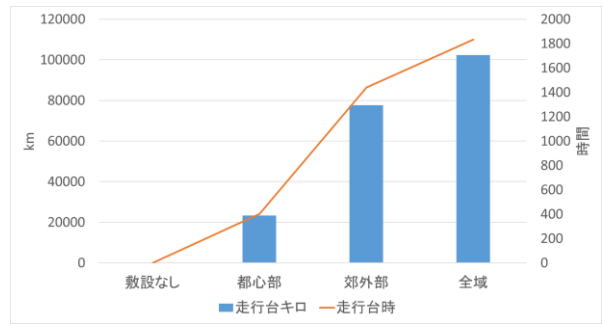


図-14 専用レーン敷設と AV 専用レーン走行台キロ・走行台時の変化

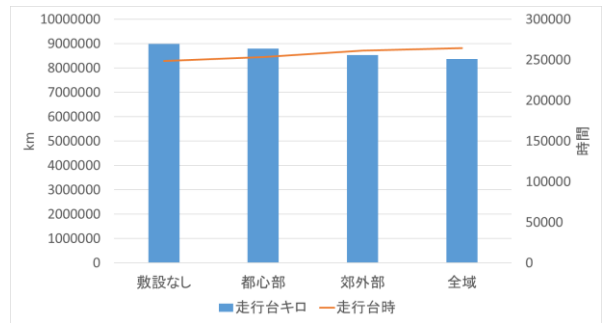


図-15 専用レーン敷設と普通車通行レーン走行台キロ・走行台時の変化

滞の悪化が見られる。図-19 より、AV 専用レーンを名古屋市全域に敷設した場合、図-17 と図-18 を組み合わせるとような渋滞パターンが見られる。

次に、AV タクシー専用レーンの敷設エリアごとの AV タクシーの交通量を図-20~図-23 に示す。図-20 より、AV タクシー専用レーン敷設なしの状態における AV タクシー交通量は主に、名古屋市の東西方向の目抜き通りである広小路通りを含む、地下鉄東山線沿いの主要道路とその沿線に集中している。図-21 より、名古屋市都心部に AV タクシー専用レーンを敷設した場合は名古屋市都心部に向かう主要道路の AV タクシー交通量も増えていることが見て取れる。また、図-22 より名古屋市郊外部に AV タクシー専用レーンを敷設した場合は、都心部に連続して接続されていない郊外部のリンクでも AV 交通量が増加していることが分かる。また、図-23 より、名古屋市全域に AV タクシー専用レーンを敷設した

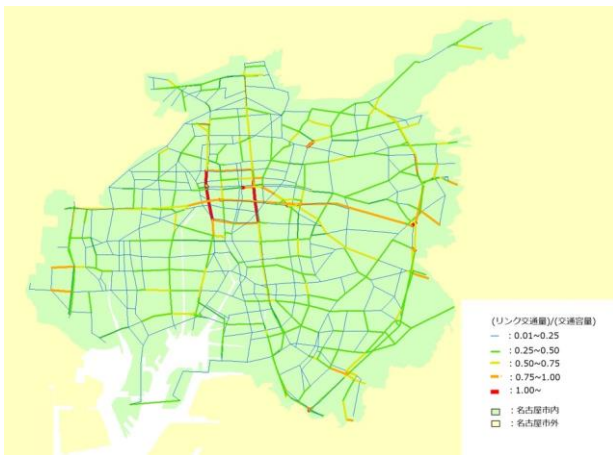


図-16 リンク混雑度 (AV 専用レーン敷設なし)

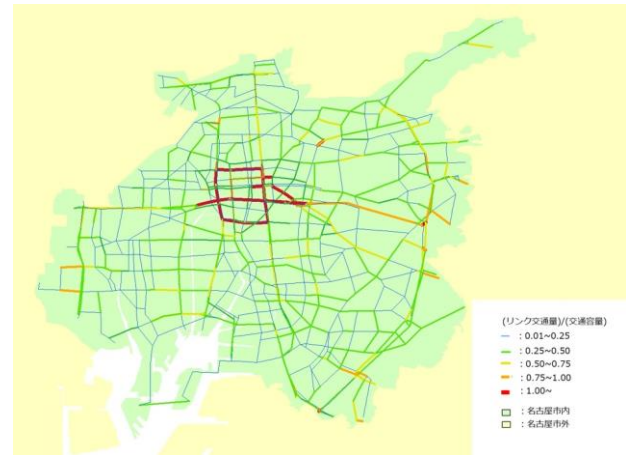


図-17 リンク混雑度 (名古屋市都心部)



図-18 リンク混雑度 (名古屋市郊外部)



図-19 リンク混雑度 (名古屋市全域)

場合は、名古屋市都心部からサークル上に広がっていることが分かる。これらから AV タクシー専用レーンの敷設エリアの広がりにも比例して、AV タクシー交通量も増加していることが分かる。

6. おわりに

本研究では交通手段選択にネスティッドロジット構造を考慮した分担・配分統合型利用者均衡配分モデルの構築を行った。RP・SP 二つのデータを同時に用いてパラメータを推定し、そのパラメータを用いた配分モデルを名古屋市に適用した。また、現在のタクシー料金からの割引率と出発予定からの平均遅れ時間(分)による AV タクシー選択量の変化を具体的に明らかにした。さらに、AV タクシー専用レーンの敷設エリアの違いによる、名古屋市の渋滞状況の変化やリンク別の AV タクシー交通量の変化も明らかにし、AV タクシーに関する様々な政策分析が可能なことを示した。

今後の課題として、SP データのさらなる調査と SP デ

ータを活用した自動運転タクシーの定数項および特性パラメータの推定がある。また、自動運転バスや MaaS 普及時にも適用可能なモデルに拡張する予定である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 16H02367, 19H02260, 19K04651 の助成を受けて実施しました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) ボストン・コンサルティング・グループ：自動運転車は、世界新車販売台数の 25%、3,000 万台越へ（完全自動運転・部分自動運転含む）～BCG 調査, 2015.
- 2) 山本真之, 梶大介, 服部佑哉, 山本俊行, 玉田正樹, 藤垣洋平：自動運転車によるシェアカーの普及に関する研究, 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集, pp.1324-1327, 2016.
- 3) 上条陽, 羅力晨, トロンコソ・パラディ・ジアンカルロス, 高見淳史, 原田昇：エージェントベースシミュレーションを用いた自動運転車普及シナリオの評価, 交通工学論文集, Vol. 5, No. 2, pp.A142-A151, 2019.

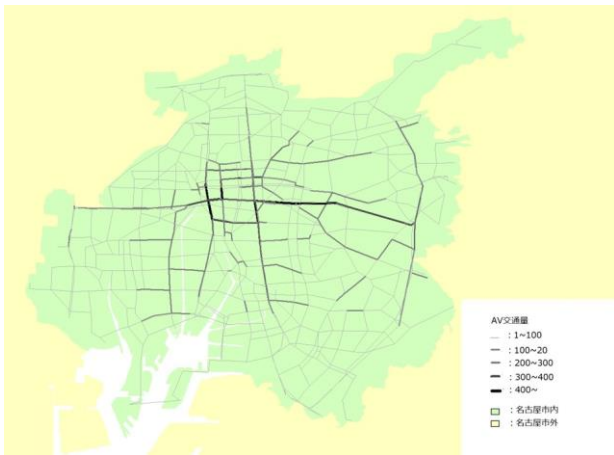


図-20 AV タクシー交通量図 (AV 専用レーン敷設なし)

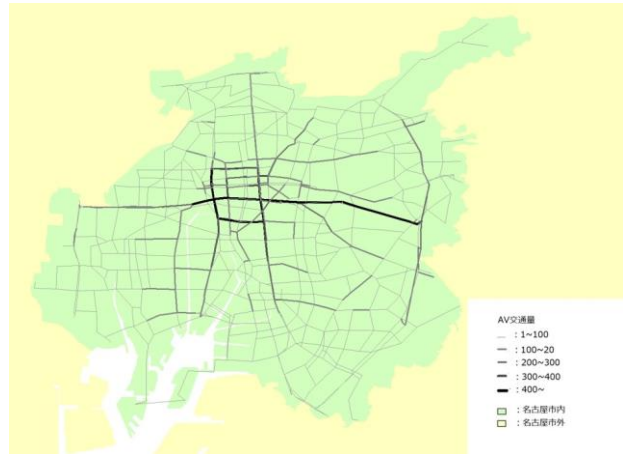


図-21 AV タクシー交通量図 (名古屋市都心部)

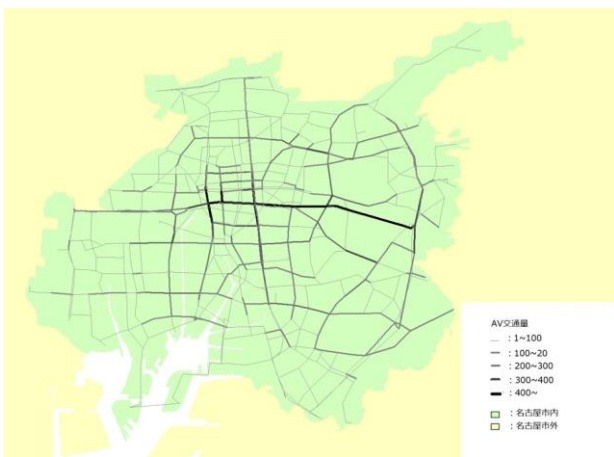


図-22 AV タクシー交通量図 (名古屋市郊外部)

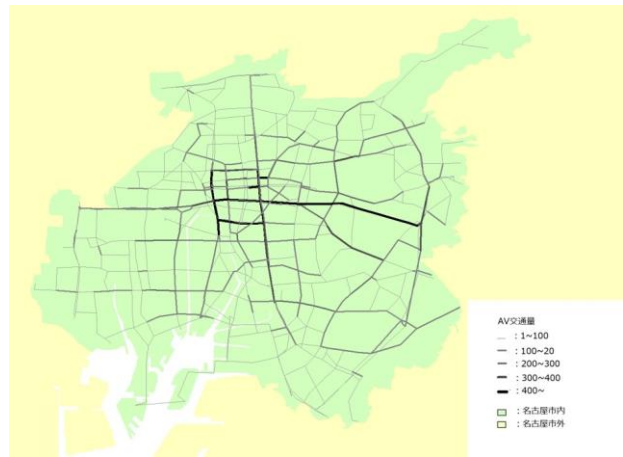


図-23 AV タクシー交通量図 (名古屋市全域)

- 4) 森川高行, Ben-Akiva, M.: RP データと SP データを同時に用いた非集計行動モデルの推定法, 交通工学, Vol. 27, No. 13, pp.21-30, 1992.
- 5) Carrasco, J. A. and Ortúzar, J. de D.: Review and assessment of the nested logit model, Transport Reviews 22(2), pp.197-218, 2002.
- 6) Cherchi, E. and Ortuzar, J. de D.: On fitting mode specific constants in the presence of new options in RP/SP models, Transportation Research Part A 40, pp.1-18, 2006.
- 7) 溝上章志, 松井寛, 可知隆: 日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発, 土木学会論文集, Vol. 401/IV-10, pp.99-107, 1989.
- 8) 土木学会土木計画学研究委員会: 非集計行動モデルの理論と実際, 1996.
- 9) Friedrich, B.: The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic, Maurer M., Gerdes J., Lenz B., Winner H. (eds), Autonomous Driving, pp.317-334, Springer, 2016.