

共有型完全自動運転車両の普及に関する基礎分析

紀伊 雅敦¹・横田 彩加²・高 震宇³・中村 一樹⁴

¹正会員 香川大学准教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町221-20)

E-mail: kii@eng.kagawa-u.ac.jp

²非会員 東電設計株式会社 土木本部 地下環境技術部 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12)

E-mail: ayaka-yokota@tepsco.co.jp

³学生会員 香川大学大学院工学研究科 (〒761-0396 香川県高松市林町221-20)

E-mail: s15d601@stu.kagawa-u.ac.jp

⁴正会員 香川大学助教 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町221-20)

E-mail: knaka@eng.kagawa-u.ac.jp

本研究は共有型完全自動運転車両 (LV5) の普及モデルを構築し、その車両価格、都市半径、人口、走行速度が普及に与える影響を分析した。その結果、1)個人所有の従来型車両の10倍以上の費用でも一定程度の普及が見込まれること、2)共有型LV5の普及には車両費用のみならず、都市半径と走行速度も大きく影響し、都市半径が小さいほど、また走行速度が高いほど普及率が高まること、3)都市人口は普及率に影響しないこと、4)車両費用と都市半径のクロス分析から、車両費用が相当程度に高くても、半径の小さいコンパクトな都市では高い普及率を達成しうることが示された。以上の結果より、システム価格の高い導入初期段階では、発着地ペアが空間的にコンパクトな小都市やサービスエリアを限定して導入することが普及率を高める上で効果的であり、車両費用の低下に応じて大都市への展開やサービスエリアの拡大を行うことが、普及率の確保に必要なことが示唆された。

Key Words : Automated vehicles, market diffusion, urban area

1. 序論

近年、自動運転技術が注目されており、中でも無人走行が可能で、完全自動運転車両の実用化が期待されている¹⁾。SAEの定義では、現在の運転を完全に人手に依存する車両をLevel 0 (以下LV0) と分類し、運転に人の責任を介しない完全自動運転はLevel 5(以下LV5)としているが²⁾、LV5の国際基準調和については中長期的課題として情報交換を行うにとどまっている。一方、完全自動運転を支える技術革新は進展しており、日米欧で公道走行を含む実証実験が進んでいる^{3,4)}。

このようにLV5車両は中長期的技術とみられており、その普及に関する研究は十分ではない。ARK Investは一連の産業研究^{5,7)}で現在7万ドルの自動運転車両用レーダーシステムは、普及が進めば2020年には1千~2千ドルになると予想している。その場合、共有された自動運転車両の走行コストは\$0.35/mileとなり、San Franciscoのタクシーコストの\$6.84/mileを大幅に下回り、さらには自家用車

の走行コストの\$0.70/mileをも下回るとしている。

しかし、自動運転車両の走行コストは要求される安全水準とそれに応じたシステム要件により異なると考えられ、また共有型サービスでは車両の稼働率も大きく影響する。LV5車両については、現在のところ法的な責任主体も明確では無く、また前述の通り国際基準の議論も始まっていない。このため、自動運転車両コスト、あるいは非常時のバックアップ体制等を含めたシステムコストは不確実性が高いと考えるべきであろう。

自動運転車によるシェアカーの普及可能性を検討した山本ら⁸⁾の研究では、交通機関選択モデルを用い、自家用車よりも自動運転シェアカーの分担率が高くなる条件として、待ち時間が1分以内、費用が55円/km以下と求め、名古屋市名東区を対象に、その条件を満たす供給台数をシミュレーションにより算定している。分析の結果、シェアカー1台当たりの売り上げは対象地域の平均走行速度により異なり、30km/hならば採算性を確保しうが、渋滞等が発生し平均速度が下がると採算性の確保は難し

いとしている。なお、この研究での車両コストはタクシー程度と想定していると推察される。

このように、共用型自動運転車両の普及には、車両コストと稼働率が影響すると考えられるが、その両者を包括的に分析した研究は見られない。特に、稼働率には、需要密度や走行距離など都市条件も影響すると考えられる。本研究では、単純化した都市条件の下で、共有型完全自動運転 (LV5) 車両の普及条件を明らかにすることを目的とする。これにより、LV5のコスト影響を検討すると共に、普及に適した都市条件を議論する。

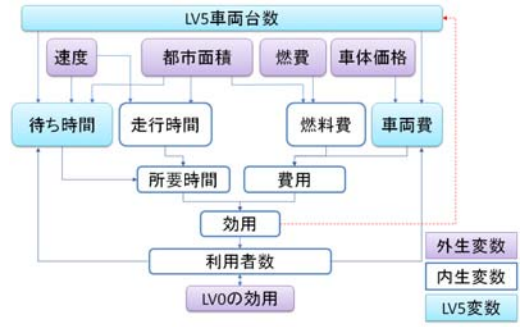


図-1 LV5利用者数の推計フロー

2. 分析の枠組み

ここでは、共有型完全自動運転車両 (以下LV5) の普及特性を明らかにするための、できるだけ単純化した分析枠組みを作成する。

まず、消費者は都市に居住し、都市内の任意の地点間を一定回数移動すると仮定する。移動距離は都市の大きさに依存するものとする。その際、交通手段として完全自動運転車両 (以下LV0) かLV5のいずれかを選択すると仮定し、その他の移動手段は想定しない。車両の特性から、LV0は個人所有とし、LV5は共有されるとする。LV0とLV5の選択はそれぞれの移動にかかる時間と費用に基づき決定される。費用は車両費用と燃料費用で構成される。共有されたLV5の車両費用は利用者で等分される。LV0の待ち時間はゼロだが、LV5は順番待ちおよび配車にともなう待ち時間が生じる。導入されるLV5の台数は、その利用者の効用が最大化するよう決められるものとする。利用者の効用は移動にかかる所要時間が短くとも費用が安いほど高まると想定する。

以上の想定に基づく利用者数の推計フローを図-1に示す。まず、都市面積は外生変数として与えられ、これにより走行距離が算定され、走行速度から走行時間が決定される。LV5の待ち時間は、走行時間、LV5の車両台数、および利用者数の関数となる。以上の走行時間と待ち時間の和として所要時間は定義される。

燃料費は車両燃費と走行距離から算定され、車両費用はLV5の車体価格と車両台数、および利用者数に基づき算定される。費用は燃料費と車両費の和で定義する。以上の所要時間と費用に基づき効用を定義し、LV0の効用との差から利用者数が決定されるとする。

一方、LV5の車両台数は利用者数が与えられた下でLV5利用者の効用を最大化するよう決定されるとする。すなわち、LV5の車両台数と利用者数は同時決定されることになる。推計においては、利用者数と車両台数を交互に求め、両者が変化しなくなる点を均衡点として求めることとする。

なお、自動運転技術は交通安全上の効果が期待されているが、事故回避効果を時間と費用に関わる期待損失の削減として定量化できれば、この推計フローで扱うことが可能である。ただし、自律型あるいはインフラ協調型の自動運転技術による事故削減効果は、LV0の利用時にも効果が及ぶと考えられ、これはLV0の効用を変化させる。本研究ではLV5普及に影響する車両条件と都市条件に注目するため、事故削減効果については考慮しない。また、同様の理由により、LV0とLV5の燃費も同一と仮定する。

3. LV5車両の普及モデル

前節の枠組では、1)利用者によるLV0とLV5の選択、2)共有されるLV5車両台数の最適化、3)待ち時間の算定が必要となる。本研究では、1)についてはロジットモデル、2)についてはクラブ財の理論⁹⁾、3)については待ち行列理論を援用し、これらを組み合わせてLV5車両の普及をモデル化する。

(1) 効用の定式化

効用 u は合成財消費量 x と余暇時間消費量 s で構成されると仮定する。個人は時間・所得制約下で効用を最大化するよう x, s を決定する。ただし、LV0 利用と LV5 利用では移動に関わるコストと時間が異なる。この時間・所得制約下での効用最大化問題を次式で表す。

$$\max u = x^{\alpha_x} s^{\alpha_s} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } I = wT_w = x + C_{LVk} \quad (2)$$

$$T_D = T_w + s + T_{LVk} \quad (3)$$

ここで、 I は所得、 w は賃率、 T_w は労働時間、 C_{LVk} はレベル k の車両利用に伴うコスト ($k \in \{0,5\}$)、 T_D は1日の利用可能時間、 T_{LVk} はレベル k の車両利用に伴う時間で

あり, α_x, α_s は選好パラメータである. 効用を最大化する x, s は以下のように導出される.

$$x = \alpha_x (wT_D - wT_{LVk} - C_{LVk}) \quad (4)$$

$$s = \alpha_s \frac{wT_D - wT_{LVk} - C_{LVk}}{w} \quad (5)$$

これより, 間接効用関数は次式となる.

$$V_{LVk} = \frac{\alpha_x \alpha_s}{w^{\alpha_s}} (wT_D - wT_{LVk} - C_{LVk}) \quad (6)$$

(2) 車両利用の費用と時間

a) LV0の費用と時間

LV0 は個人所有されると仮定し, 1 日当りの車両のコスト C_{LV0} は, 車両価格を廃車までの利用日数で除した 1 日当りの車両価格 CV_{LV0} と, 1 日の移動に伴う燃料費 CF_{LV0} の和で表されると仮定する.

$$C_{LV0} = CV_{LV0} + CF_{LV0} \quad (7)$$

また, 利用時間 T_{LV0} は, 移動時間に等しい.

b) LV5の費用と時間

LV5 は共同所有されると仮定する. 1 日一人当りの車両のコストは, 1 日当りの車両コスト $y \times CV_{LV5}$ を利用人数 N_{LV5} で除したものとす. ただし, y は車両台数である. また, 1 日当りの総利用コスト C_{LV5} は車両費用に 1 日の移動に伴う燃料費 CF_{LV5} を加えたものと仮定する.

$$C_{LV5} = \frac{y \cdot CV_{LV5}}{N_{LV5}} + CF_{LV5} \quad (8)$$

また, 利用時間 T_{LV5} は, 待ち時間を含む移動時間の期待値とする.

(3) 移動距離と費用, 時間

ここでは, まず, 都市を半径 R の円形と仮定し, 都市内の 1 トリップ当りの期待移動距離を求める. 出発地と目的地は都市内に一様に分布していると仮定する. 出発地の極座標を (r_s, θ_s) , 目的地の極座標を (r_e, θ_e) とすると, 両地点の直線距離は余弦定理より,

$$g(x_s, \theta_s, x_e, \theta_e) = \sqrt{x_s^2 + x_e^2 - 2x_s x_e \cos(\theta_s - \theta_e)} \quad (9)$$

である. 対称性から $\theta_s = 0$ とすると, 期待移動距離 D_E は次式で与えられる.

$$D_E = \frac{2}{\pi R^4} \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^R g(x_s, 0, x_e, \theta_e) x_s x_e dx_s dx_e d\theta_e \quad (10)$$

a) LV0の移動費用と時間

燃費を c_M (円/km), 速度を v_M , 日トリップ数を m とすると, 燃料費 CF_{LV0} , 移動時間 T_{LV0} は次式となる.

$$CF_{LV0} = mc_M D_E \quad (11)$$

$$T_{LV0} = \frac{m}{v_M} D_E \quad (12)$$

b) LV5の移動費用と時間

LV5 では, 直接移動に関わるコスト・時間に加えて, 自動運転車両の配車時間と他のメンバーの利用中の待ち時間がかかる. 両者を合わせたものが, 待ち行列理論におけるサービス時間に相当する.

まず都市内に y 台の LV5 車両がランダムに存在する場合, 地点 x で配車を希望する際の最寄り車両までの距離の期待値は次式となる.

$$\begin{aligned} \bar{r}(x) = & \int_0^{R-x} \frac{2r^2}{R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{y-1} dr \\ & + \int_{R-x}^{R+x} \frac{2\theta_1 r^2}{\pi R^2} \left(1 - \frac{f(r)}{\pi R^2}\right)^{y-1} dr \end{aligned} \quad (13)$$

ただし,

$$f(r) = r^2(\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) + R^2(\theta_2 - \sin \theta_2 \cos \theta_2) \quad (14)$$

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{r^2 + x^2 - R^2}{2rx}\right) \quad (15)$$

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{R^2 + x^2 - r^2}{2Rx}\right) \quad (16)$$

である. これより都市全体での最寄り車両までの距離の平均は次式となる.

$$D_A = \int_0^{2\pi} \int_0^R \bar{r}(x) \frac{2x}{\pi R^2} dx d\theta = \frac{4}{R^2} \int_0^R x \bar{r}(x) dx \quad (17)$$

従って, 最寄り車両が到着するまでの期待待ち時間 T_2 は次式となる.

$$T_2 = \frac{D_A}{v_M} \quad (18)$$

期待移動距離は LV0 と同一のため, 1 回の利用にかかる LV5 車両の拘束時間は次式となる.

$$T_S = \frac{D_E}{v_M} + T_2 \quad (19)$$

これは, 待ち行列理論におけるサービス所要時間に相当する. 車両台数 y は十分多いと仮定し, 利用者は移動を希望した順に LV5 車両に振り分けられるとすると, その待ち時間は交通発生率を y で除した単一窓口モデルで近似できる. LV5 車両 1 台当たりの交通需要発生量を

$\lambda=N_{LV5}m/Hy$ (人/時間/台), 時間当りの期待処理人数を $\mu=1/T_s$ (人/時間) とする. ただし, H は 1 日の時間である. また, $\rho=\lambda/\mu$ とする. ここで, 期待値としての交通発生量よりも処理人数が少なければ, 待ち行列は無限に増加するため, $\rho < 1$ とする. すると, MM/1 の公式より, システム中の客の数の平均値 L は次式となる.

$$L = \frac{\rho}{1-\rho} \quad (20)$$

利用を希望してから交通を終えるまでの期待時間は,

$$T_U = \frac{L}{\lambda} + T_2 \quad (21)$$

となる. 以上整理すると, 自動運転車両の利用に伴う燃料費と移動時間は次式となる.

$$CF_{LV4} = mc_M (D_E + D_A) \quad (22)$$

$$T_{LV5} = mT_U \quad (23)$$

(4) LV5車両数の最適化

LV5 車両共有サービスの提供主体は, その利用者数 N_{LV5} が与えられた下で, 利用者の効用を最大化しようとする車両台数 y を決定すると仮定する. いま, LV5 利用者の間接効用関数は次式となる.

$$V_{LV5} = \alpha_x^{\alpha_s} \alpha_s^{\alpha_s} \left(\frac{1}{w}\right)^{\alpha_s} (wT_D - wT_{LV5}(y) - C_{LV5}(y)) \quad (24)$$

ここで, 式(23)より,

$$\frac{\partial T_{LV5}}{\partial y} = \frac{m}{\lambda(1-\rho)^2} \frac{\partial \rho}{\partial y} < 0 \quad (25)$$

$$\therefore \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\partial \lambda}{\partial y} T_s + \lambda \frac{\partial T_s}{\partial y} < 0$$

また, 式(8), (22)より

$$\frac{\partial C_{LV5}}{\partial y} = \frac{CV_{LV5}}{N_{LV5}} + mc_M \frac{\partial D_A}{\partial y} \quad (26)$$

ここで, $\partial D_A/\partial y < 0$ だが, y が大きくなるに従いゼロに漸近するため, y が十分大きければ $\partial C_{LV5}/\partial y > 0$ である. また, $\partial \rho/\partial y$ は $y \rightarrow 0$ で $-\infty$, $y \rightarrow \infty$ で 0 となるため, $\partial V_{LV5}/\partial y = 0$ となる y が存在すると期待される. そこで, 式(24)を用いて, V_{LV5} を最大化する車両台数 y を y^* とする.

(5) LV5車両の利用者数

LV5 利用の効用が高いほど利用者数 N_{LV5} が増加すると想定し, 次式で表されると仮定する.

$$N_{LV5} = N \frac{\exp(\theta V_{LV5})}{\exp(\theta V_{LV0}) + \exp(\theta V_{LV5})} \quad (27)$$

ただし, N は都市で交通手段を用いる人口, θ はパラメータである.

(6) 均衡条件

以上整理すると, 以下の 4 つの式を満たす N_{LV5} が均衡状態における LV5 車両の利用者数である.

$$N_{LV5} = N \frac{\exp(\theta V_{LV5})}{\exp(\theta V_{LV0}) + \exp(\theta V_{LV5})} \quad (28)$$

$$V_{LV5} = \frac{\alpha_x^{\alpha_s} \alpha_s^{\alpha_s}}{w^{\alpha_s}} \times (wT_D - wT_{LV5}(y^*, N_{LV5}) - C_{LV5}(y^*, N_{LV5})) \quad (29)$$

$$V_{LV0} = \frac{\alpha_x^{\alpha_s} \alpha_s^{\alpha_s}}{w^{\alpha_s}} (wT_D - wT_{LV0} - C_{LV0}) \quad (30)$$

$$y^* = \arg \max_y V_{LV5}(y, N_{LV5}) \quad (31)$$

このシステムの挙動を検討する. まず, N_{LV5} は下限が 0 , 上限が N であり, V_{LV5} に関して単調増加である. ここで,

$$\frac{\partial V_{LV5}}{\partial N_{LV5}} = -w \frac{\partial T_{LV5}}{\partial N_{LV5}} - \frac{\partial C_{LV5}}{\partial N_{LV5}} \quad (32)$$

であり, $\partial T_{LV5}/\partial N_{LV5} > 0$ (会員数が増加すると待ち時間が増加する), $\partial C_{LV5}/\partial N_{LV5} < 0$ (会員数が増えると一人当たり車両費用が減少する) である. 会員数が少ない段階では待ち時間は十分小さいが, 一方で, 車両費用は高い. このときには会員数が増加すると待ち時間の増加よりも, 一人当たり車両費用の低下が大きくなり効用が増加する可能性がある. 一方, 会員数が十分多い状態では, 会員数が減少すると一人当たり車両費用の増加より待ち時間の減少の方が大きくなる可能性がある. これらと, 式(27)を併せて考えると, ある状態では会員数の増加が効用を増加させ, それが再び会員数の増加に寄与するが, 別の状態では会員数の増加が効用を減少させ, それは会員数を減少させるよう働く. どのような状態となるかはコスト等のパラメータに依存するため, 場合によっては, N_{LV5} がゼロの状態が均衡解となる場合もあれば, 全人口と等しい場合が均衡解となる場合もあり, また全人口の一定割合が均衡解となる場合もある. 上記の定式化では, それを数式で解析することは困難なため, 数値解析に頼らざるを得ない.

y^* は N_{LV5} が大きいほど大きくなると考えられるが, 待ち行列の条件 $\rho < 1$ より次式を満たす必要がある.

$$y > \frac{N_{LV5}m}{H} T_s \quad (33)$$

すなわち、上記システムの均衡状態における y^* が式(33)を満たさなければ、待ち行列が無限に発散するため、システムが成立しないことになり、 $N_{LV5}y=0$ 、すなわち LV5 車両が普及しない状態が均衡解となる。

4. 数値シミュレーション

ここでは、本モデルを用い LV5 車両価格および都市条件を変化させたシミュレーションを行う。まず、モデルパラメータと固定的とする条件については、表-1のように設定した。また、式(28)~(31)の均衡解は以下のアルゴリズムで求める。

- ① N_{LV5} の初期値を与える。
- ② 与えられた N_{LV5} の下で式(31)により y^* を求める。
- ③ 得られた y^* 、 N_{LV5} の下で、式(29)、(30)を用い V_{LV0} 、 V_{LV5} を求める。
- ④ 式(28)を用い N_{LV5} を求める。
- ⑤ 従前の N_{LV5} とほぼ同じ値なら均衡状態なので終了する。異なるなら更新した N_{LV5} を用い②に戻る。

以下では、1)車両価格、2)都市半径と人口、3)走行速度を変化させた場合のLV5の利用率の感度をシミュレーションにより分析する。

(1) 車両価格の感度分析

ここでは、車両価格を変化させたときのLV5の利用率を分析する。ただし、都市人口は40万人、都市半径は11km、走行速度は25km/hとした。なお、ここでは高松市の自動車分担率を参考に、交通手段利用率を0.729と設定しており、 $N=29$ 万人としている。

LV5の車両費用に対する利用率を図-2に示す。ここで、LV5の車両費用がLV0の同程度の1000円/日ではLV5の利用率は約80%であり、10倍以上の1万円/日でも30%程度の普及率となっている。また、7万円/日で普及率はゼロとなる。待ち時間が加わるにもかかわらず、車両費用がLV0より高くても普及率が高いのはLV5は共有されているためである。LV5の車両費用が1000円/日のケースでは、一人当たりの車両コストは320円/日であり、1万円では1250円/日である。単純に車両費用に比例しないのは、車両台数 y が最適化されているためであり、車両費用が高くなるほど利用者当たりの車両台数が少なくなり、待ち時間が増加することになる。

図-3はLV5の車両費用に対するLV0とLV5の車両台数を表している。ただし、横軸の車両費用は対数である。当然のことながら、LV5の費用が低下するほど、LV0の台

表-1 パラメータ等の設定

選好パラメータ		α	0.25
		α_s	0.75
分散パラメータ		θ	0.934
一日の時間	時間	H	24
労働時間	時間	T_w	8
利用可能時間	時間	T_D	18
賃率	円/時間	w	3000
トリップ数	回/日	m	2
LV0車両費用	円/日	CV_{LV0}	853
燃費	円/km	c_M	8.867
ガソリン代	円/l		133
燃費	km/l		15
交通手段利用率			0.729

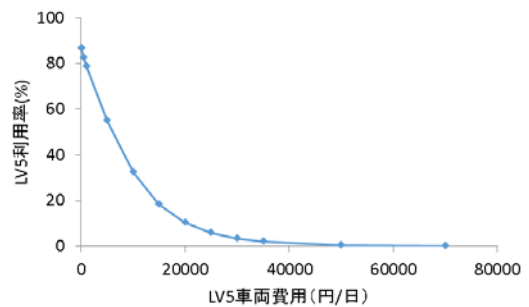


図-2 車両価格に対する利用率

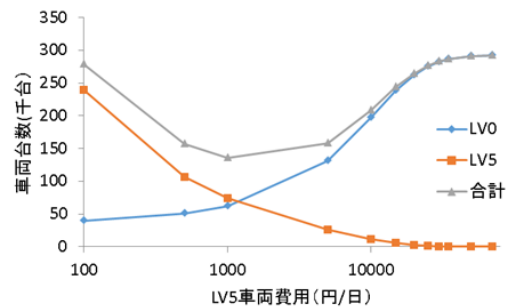


図-3 車両価格に対する車両台数

数は減少する。LV5のコストが千円/日まではLV0とLV5の合計台数も減少するが、それ以下になるとLV0の減少台数をLV5の増加台数が上回り合計台数も増加する。

(2) 都市半径と人口の影響

次に、都市条件が共有型LV5の普及に及ぼす影響を分析する。図-4は人口密度に対するLV5の普及率を示しているが、都市人口を一定として都市半径を変化させた場合と、都市半径を一定として人口を変化させた場合の2つのケースを示している。ただし、LV5の車両コストは1万円/日としている。図より、前者のケースでは、人口密度が高いほど、すなわち都市半径が小さいほど普及率が高まるのが分かる。一方、後者のケースでは都市半径が一定で人口が変化してもLV5の普及率は変わらな

いことが分かる。すなわち、本モデルが想定下では、人口規模はLV5の普及に影響せず、都市の空間的広がりのみが影響することになる。都市半径が大きくなると、式(10)、(17)より、移動距離や配車距離が長くなり、このため、サービス所要時間が長くなる。すなわち1台当たり処理できる利用者数が減少するため、一人当たりの車両費用が高くなり普及率が低下することとなる。一方で、都市半径が変わらなければ、人口が増加しても一人当たりのコストには影響しないため、普及率は変わらないこととなる。

(3) 走行速度の影響

前節では混雑を考慮していないため、都市半径が一定なら人口密度は普及率に影響しない結果となった。ここでは、混雑の影響を把握するため、走行速度を変化させた場合のLV5の普及率を示す。ただし、LV5の車両コストは1万円/日、都市人口は40万人、都市半径は11kmとしている。

走行速度が10km/h以下では、普及率は1%以下だが、速度が高くなるに従い普及率も増加する様子が分かる。これは、速度が速くなるとサービス時間が短くなり、1台当たりの輸送可能な利用者が増加することから、一人当たりの車両コストが安くなることを反映している。

(4) 車両費用と都市半径のクロス分析

図-6はLV5の車両費用と都市半径に対するLV5の普及率を表している。車両費用が高く、都市半径が大きい右上の領域では普及率がゼロになることが示されている。

また、図より、車両費用が相当程度に高くても、半径の小さいコンパクトな都市では高い普及率を達成しうることが分かる。一方で、車両価格が安くなれば、都市半径の大きい都市でも一定程度普及しうることを読み取ることができる。

このことから、費用の高い導入初期段階では、発着地ペアが空間的にコンパクトにまとまっている小都市や、都市内でもエリアを限定して導入することが、共有型LV5の普及率を高める上で効果があると考えられる。また、大都市への展開や、サービスエリアの拡大は、車両費用の低下に応じて行うことが、一定の普及率を確保する上では必要なことが示唆される。

5. 結論

本研究は共有型完全自動運転車両 (LV5) の包括的な分析枠組みを、クラブ財理論、ロジットモデル、待ち行列理論に基づき構築し、その分析モデルを用いて、共有型LV5の普及率の車両価格、都市半径、人口、走行速度

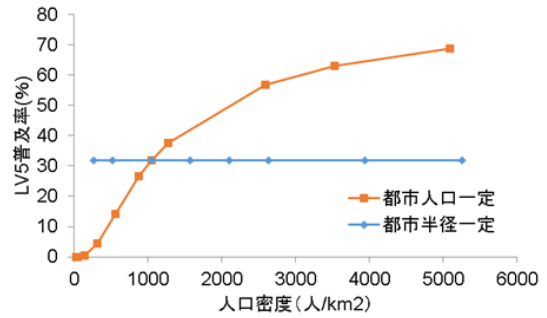


図-4 人口密度に対するLV5普及率

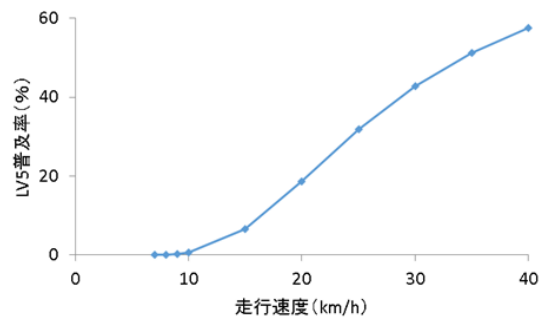


図-5 走行速度に対するLV5普及率

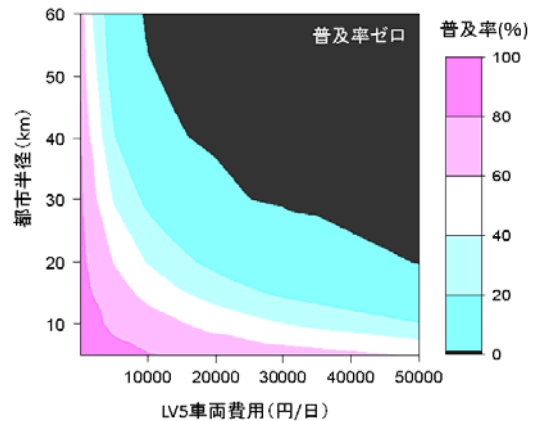


図-6 車両費用と都市半径に対するLV5普及率

に対する感度を分析した。その結果、LV5の車両費用が低いほど普及が進むが、1日当たりの車両費用が1万円といった、個人所有のLV0車両の10倍以上の費用であっても、一定程度普及しうること示した。

また、共有型LV5の普及には車両価格のみならず、都市半径と走行速度も大きく影響することを示した。都市半径が小さいほど平均的なOD距離は短くなり、一人当たりのサービス時間が短くなる。このため、1台当たりの利用者数が多くなることから、一人当たりの車両費用は低くなり、普及率は高くなる。また、平均速度の上昇も同様の効果をもたらし、普及率を高めることを示した。一方、都市の人口規模はLV5の利用費用には影響せず、

普及率にも影響しないことが示された。

また、車両費用と都市半径のクロス分析から、車両費用が相当程度に高くても、半径の小さいコンパクトな都市では高い普及率を達成しうることが示された。一方で、車両価格が安くなれば、都市半径の大きい都市でも一定程度普及しうることが示された。これらのことから、システム価格の高い導入初期段階では、発着地ペアが空間的にコンパクトな小都市やサービスエリアを限定して導入することが普及率を高める上で効果的と考えられる。また、大都市への展開や、サービスエリアの拡大は、車両費用の低下に応じて行うことが、一定の普及率を確保する上では必要なことが示唆された。

ただし、以上の結論は、数多くの仮定や条件設定に基づいていることに留意が必要である。まず、都市が円形で交通需要が空間的、時間的に一様に分布しているとの仮定は、現実の状況に当てはめるときにバイアスをもたらさう。例えば、実際の都市では中心部ほど交通密度が高く郊外では低くなっているが、この場合、期待される移動距離は、交通需要に一様分布を仮定するよりも短くなると考えられる。その場合、広い都市での普及率が本推計より高くなると考えられるが、一方でLV5利用のODが郊外間など長距離に偏る場合には普及率は低くなる。また、所要時間の推計では、交通需要発生時のピークを考慮していない。交通需要がピーク時に集中する場合には、当然のことながらより多くの車両が必要とされ費用は高くなり、普及率は本推計より低くなるだろう。

加えて、本研究ではLV5の事故削減効果や燃費改善効果などを考慮していない。事故削減は外部効果をもたらすためLV0の効用も増加する。これは社会的便益をもたらすことから、LV5導入に対する補助金など政策干渉も検討の余地がある。また、自動運転車両が交通流を改善する効果も期待されている。その場合には、燃費改善による社会的なメリットも生じうるであろう。

以上、より現実的な状況の反映や、未考慮の社会的効果の把握など、残された課題があるが、マイクロシミュレーション等を用いた手法⁴⁾と比較して、本手法は計算量が少なく、より包括的な分析が可能と考えられる。今後は、両手法の結果の比較など、よりロバストな効果分析が必要と考える。

謝辞：本研究は科研費（25281071, 15H02869）による成果の一部である。

参考文献

- 1) 内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）：SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）自動走行システム研究開発計画，2015.
- 2) 谷口正信：自動運転の国際基準調和活動，自動車技術，Vol. 69, No.12, pp.12-17, 2015.
- 3) 内村孝彦：自動運転実現に向けた欧米の動向，自動車技術，Vol. 69, No.12, pp.22-27, 2015.
- 4) 工保淳也，藤生慎，高山純一，中山晶一郎：交通流シミュレータを用いた自律型自動運転自動車の社会受容性の分析，土木計画学研究・講演集，Vol.53, pp.1193-1197, 2016.
- 5) Keeney, T.: Autonomous Cars, Enormous Opportunity, ARK Research, 2014. (<https://ark-invest.com/research/autonomous-cars-enormous-opportunity>, accessed 2016.6.6)
- 6) Keeney, T.: What If Uber Were To Adopt Shared Autonomous Vehicles (SAVs)?, ARK Research, 2015. (<https://ark-invest.com/research/shared-autonomous-vehicles>, accessed 2016.6.6)
- 7) Keeney, T.: Low Cost LiDAR Will Save Lives, ARK Research, 2015. (<https://ark-invest.com/research/low-cost-lidar-will-save-lives>, accessed 2016.6.6)
- 8) Berglas, E.: On the theory of clubs, American Economic Review 66, 116-121, 1976.

(2009.7.1 受付)

THE EFFECT OF URBAN CONDITIONS ON DISSEMINATION OF SHARED FULLY-AUTOMATED VEHICLES

Masanobu KII, Ayaka YOKOTA, Zhenyu GAO and Kazuki NAKAMURA

In this study, we developed a diffusion model of shared fully-automated vehicles (LV5) and applied this model to the impact analysis of vehicle price, urban extent, population and travel speed on the LV5 dissemination. As a result, we found 1) the LV5 is expected to obtain the certain share of demand even under the 10-fold high cost of conventional personally-owned vehicles, 2) the share of LV5 vehicles is sensitive not only to the vehicle cost but also to the urban extent and travel speed, 3) urban population does not affect the LV5 share, 4) the high share of LV5 can be achieved even with the high vehicle cost if the urban extent is compact. These results indicate that the shared LV5 service should be introduced in the small cities with compact urban extent initially if the cost of LV5 is expensive. To achieve the higher diffusion rate of LV5, the shared service should be introduced in large cities according to the cost reduction of vehicles.