

自動運転の経済価値評価とその普及政策*

久保田雄貴、玉木絢子、市川拓弥、小森聡、小原周

1. 自動運転

1-1. 自動運転の定義

人がハンドルを握って操縦せずに自動で運転する車のことを「Autonomous car」、またの名を自動運転という。その他に「UGV」「ドライバーレスカー」ともよばれる。この自動運転技術の概念の誕生は、1939年から1940年にかけて開催されたニューヨーク万国博覧会にまでさかのぼる。ノーマン・ベル・ゲディーズのデザインで、ゼネラル・モーターズ（GM）社が出展したジオラマ展示・ライド型アトラクションである「フューチャラマ」(図1-1を参照)は、1939年から20年後のアメリカの様子を模して、様々な理



図1-1 ジオラマの様子

出典：Wikipedia『フューチャラマ』

* 社会科学総合学院赤尾健一教授の指導の下に作成された。

想都市の模型が並ぶ中の一つに「オートメイトド・ハイウェイ（自動化高速道路）」があった。電波でのガイドのもと、前後の車間距離を調整しながら高速道路を走る車の姿は、「フューチャラマ」の中で提案されたもののなかでも最も進んだ技術であった。当時は夢にあふれる未来の技術であったが、交通安全へと視点が変わったのは後の50年代のアメリカで、当時のRCA（電気機器・半導体事業を中心とする米国企業）の副社長であったツヴォルキン氏が吹雪の中のハイウェイ事故に心を痛み、開発を開始したのがきっかけであるといわれている。

その後自動運転は、1950年から21世紀現在にかけて、技術と時代背景から大きく4期に分けることができる（津川 2013）。

第1期（1950～1960年代）では、道路に誘導ケーブルを敷いてラテラル制御を行う協調システムが研究された。この路車協調型自動運転は、ケーブルをあらかじめ埋設することと交流電流の供給から、テストコースなど利用できる場所が限られてしまう。このため現在では自動車の様々な試験に利用されるに留まっている。

第2期（1960～1980年代）には、自動検査や制御システムなどのコンピュータービジョンの応用形であるマシンビジョンを用いた自動運転システムの研究が進んだ。70年代には日本で世界初のマシンビジョンを利用した自動運転システムの知能自動車が登場し、80年代にはアメリカやドイツが軍事目的で自動運転の研究を進めた。

第3期（1990年代）は、高度道路交通システム（ITS）¹⁾プロジェクトによって単独の自

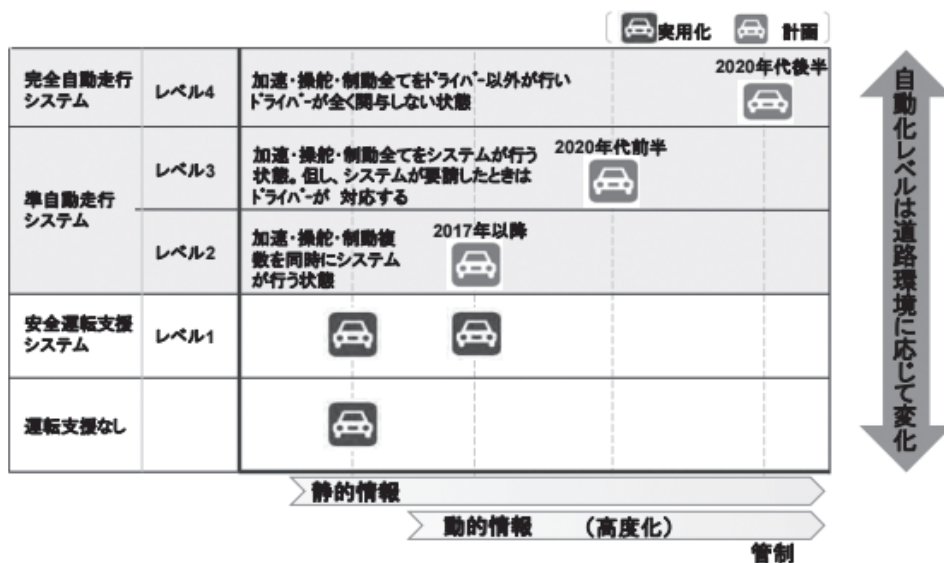


図1-2 自動走行システムのレベルと実現期待時期

出典：内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）

自動車から複数の自動車が車間距離を保ちながら走行するプラトーン走行が新たに出現し、イギリス、アメリカ、日本各国でこの技術を応用した自動運転の開発が進められた。

そして現在までの第4期では、それまでとは異なり、対象とする車を乗用車からトラックや路線バス、小型低速の車両にシフトし、近い未来での実用化を目指した研究が続けられている。

このような時代背景の中、自動運転は安全面、環境面から急速な関心の高まりが予想されている。現在、自動運転は技術に応じて以下のようなレベル分けがなされている。

図1-2のレベルは、日本政府および米国運輸省道路交通安全局（NHTSA）が定義したものである。いずれのレベルにおいても、人が制御システムに介入することが可能である。現状、レベル3に該当する自動車は市販されていない。日本政府は2020年までにレベル3の自動運転システムの実用化を目指し、多くのメーカーがこのレベルをクリアするために研究を行っている。

1-2. 国内外の状況

(1) 開発競争

現在世界では自動車メーカーだけでなくITやエレクトロニクス分野においても自動運転の開発競争が発生している。各社は様々なポイントに重点を置いているが、次に示す4つのコア技術が競争上の重要なポイントとなっている（図1-3も参照）。

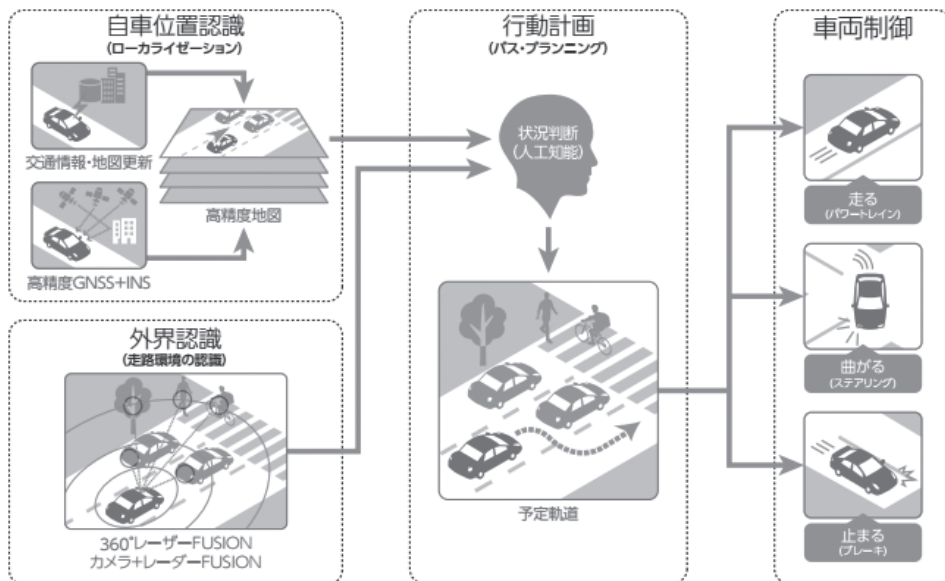


図1-3 自動運転システムの構成例

- ①自動位置認識
 - ②外界認識（走行時周辺の自動車や人、障害物などの認識）
 - ③行動計画（車線変更や目的地までその場の状況に応じてどう行動するか）
 - ④車両制御（走る、止まる、曲がるなど基本的な動作をスムーズに行えるか）
- では日本国内、海外ではどのように開発が行われているのだろうか²⁾。

(2) 日本

前述の通り、知能自動車など日本は早期の段階から自動運転の開発に取り組んでいる。実用化はされていないものの、日本の研究は世界で見ても進んでいたが、昨今の欧米諸国の急速な技術発展や日本の自動運転に対する法整備の準備不足によって、大きく後れをとっている。国外の開発状況から国内開発のための法律の見直しを迫られた政府は、国土交通省でこの自動運転を「オートパイロットシステム」と呼称し、政府、民間と協力して2020年までに自動運転の開発、実現に向けて取り組んでいる。

① ホンダ

ホンダは2014年に「Honda SENSING/AcuraWatch」と銘打ち、2020年までの安全ロードマップを示した（図1-4）。

回避支援や未然防止など安全運転支援システムなどは、すでに2015年1月に販売したオデッセイから様々な新商品に搭載されている。今後新たな安全運転の価値を創出するにあたり2020年までに自動運転技術を完成させる予定である。

② 日産

日産のカルロス・ゴーン社長は、2016年までに日本で自動運転付きの自動車を販売す

安全技術ロードマップ

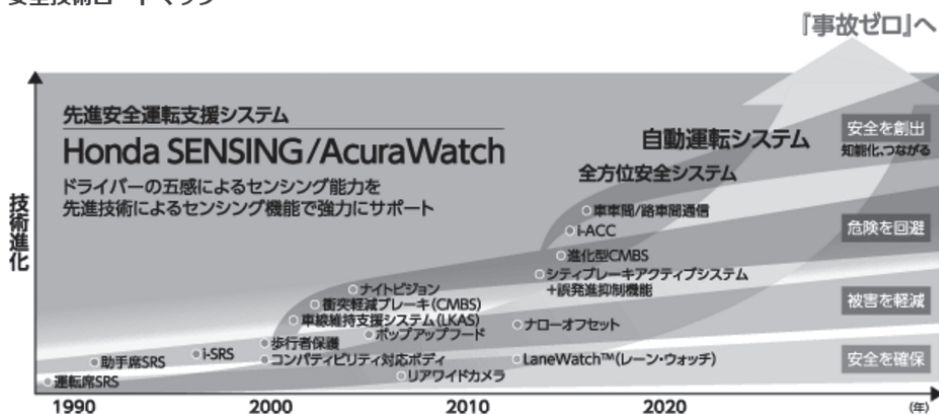


図1-4 安全技術ロードマップ

出典：HONDA ホームページ

ると公言している。持続可能なモビリティ社会を形成するために、二酸化炭素排出をゼロにする「ゼロエミッション」と交通事故ゼロを目標とする「ゼロフェイタリティ」を掲げている。自動運転を可能にする「パイロットドライブ1.0」は、混雑した高速道路上の自動運転を想定しており、渋滞時のゆっくりとしたスピード車線変更や前進を自動で行われるものである。現行は自動運転の先駆けとして移動物検知などの機能が搭載された自動車を販売している。

③ トヨタ

トヨタは2020年までに自動運転を搭載した自動車販売を目標としており、首都高速道路でのデモ走行を行った。完全な自動運転ではなく、あくまでも安全運転補助機能としての自動運転を想定して開発を進めている。トヨタは、豊田社長や役員「主権はあくまでもドライバー、移動の楽しさと安全な運転を両立させたい」という発言から、一般には、自動運転に消極的と捉えられている。しかし実際は、1990年代から自動運転の研究を開始し、今年の実験では車線変更や合流もこなしている。ただし2020年商用化に向けて、様々な状況下での検証、コスト低減などの課題が残されている。

(3) 海外の状況

海外では大手自動車メーカーだけでなくIT企業や新興企業も参入し、その競争は激化の一途をたどっている。ここでは各国で注目されている自動運転技術を比較する。

① アメリカ

TRB（米国交通運輸研究会議）では、1990年代から自動運転に関する調査研究や情報を発信している。DARPA（米国防総省高等研究計画局）は独自のコンテストを開催しており、2004年から開催しているDARPAチャレンジ（ロボットカーのレース）には多くの企業が参加している。

検索機能やクラウドなど、様々なインターネット事業を展開するアメリカの多国籍企業Googleは、スタンフォード大学の人工知能研究所とグーグルマップの共同開発でドライバーレスカーの研究を進めている。トヨタ社のレクサスなどの車に、各種センサーやカメラを装着したGoogle Chauffeurと呼ばれる自動運転システムを搭載して実験を重ねている（図1-5）。

また今年の夏からは、センサー、カメラをあらかじめ搭載し、ハンドルがない自社製車の走行試験を開始した。これには必ずドライバーが乗車し、時速40キロ以上は出ない仕組みとなっている。なお、現状では雪や大雨などの状況悪化により、運転が停止してしまうことや膨大な地図データを取り込む必要があり、改善に向けて研究を重ねている（図1-6）。

② 欧州



図 1-5 トヨタ車を使用した自動運転のテストドライブ

出典：Wikipedia『ドライバーレスカー』



図 1-6 Google 社オリジナルの自動運転車

出典：Engadget 日本版

欧州委員会では、産官学共同で自動運転車の開発が行われており、様々なメーカーが開発を行っている。メルセデス・ベンツは、速度調整など半自動運転の追従走行を運転支援システムとして搭載した車両を販売している。BMW は Connected Drive という自動運転技術を開発しすでに 5000km の走行に成功している。

③ 国際的取り組み

国連では自動運転技術の躍進に伴い、国連、欧州経済委員会、道路交通安全部会、ITS インフォーマル会議などにおいて自動運転の定義化、1968 年に締結された道路交通条約の改正を検討している。

2. 日本の渋滞状況

2-1. 渋滞の実態と損失

自動運転の普及によって、渋滞の軽減とそれによるエネルギー節約や汚染物質の排出削減が期待されている。そこで本節では、日本の渋滞状況を見る。

日本の一般道、高速道路では多くの渋滞が発生しており、多大の「渋滞損失時間」や「渋滞損失」が発生している。

「渋滞損失時間」とは、渋滞によって遅れた時間を表現する数値で、実際にかかった時間と、過去のデータをもとに定めた標準的にかかる時間（基準所要時間）との差分によって計算される。渋滞による損失時間は年間 38.1 億人時間（国民 1 人当たり年間約 38 時間）にのぼる。

また、「渋滞損失」とは、ある区間を自動車で行く際に要する基準旅行時間から実際の旅行時間を引いた時間を指す。国土交通省によると、日本全国の渋滞損失を貨幣価値に換算すると年間 12 兆円にも上る。これは、日本の自動車の総輸出額とほぼ等しく、

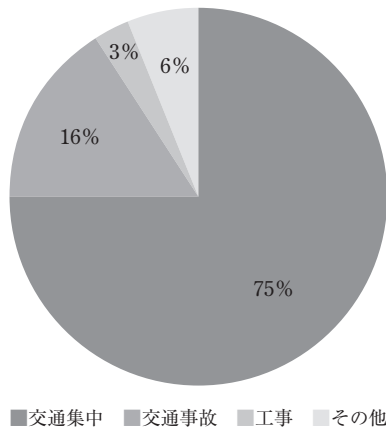


図 2-1 2013 年の渋滞発生要因

出典：NEXCO 東日本 道路管理運営事業

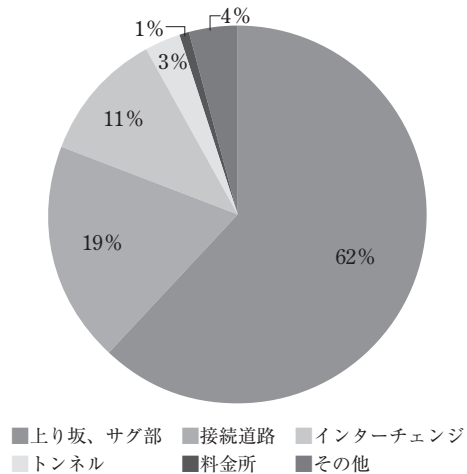


図 2-2 2013 年の自然渋滞発生箇所

出典：NEXCO 東日本 道路管理運営事業

GDP に置き換えると日本全体の約 2%、横浜市全体の付加価値額に相当する。

では、どういったことが原因で渋滞が発生しているのだろうか。

高速道路における渋滞とは、NEXCO 西日本によると、「時速 40km 以下で低速走行、あるいは停止発進を繰り返す車列が 1km 以上かつ 15 分以上継続した状態」と定義されている。高速道路における主な渋滞原因には、以下の 3 つがある³⁾。

- (1) 交通容量以上に交通が集中することにより発生する「交通集中渋滞」：75%
- (2) 工事の規制に伴って発生する「工事渋滞」：3%
- (3) 交通事故によって発生する「事故渋滞」：16%

2-2. 自然渋滞の原因⁴⁾

自然渋滞、特にその中でも最大の渋滞発生原因である交通集中については、それが発生する場所が大きく分けて 5 つある。

① 上り坂及びサグ部【交通集中渋滞の約 62%】

下り坂から上り坂にさしかかる所を「サグ」と呼ぶが、そのような所では気付かないうちに速度低下してしまう車があり、後続の車との車間距離が縮まることから、次々に後続の車がブレーキを踏むことになり、渋滞が起こる。

② トンネル入り口部【交通集中渋滞の約 3%】

トンネルにさしかかった際に、トンネル入り口部の暗がりや圧迫感により、一時的に速度が低下してしまう車があり、後続の車との車間距離が縮まることから、次々に後続の車がブレーキを踏むことになり、渋滞が起こる。

③ インターチェンジ合流部【交通集中渋滞の約 11%】

インターチェンジから流入する車の合流に伴い、一時的な交通容量の不足により渋滞が起こる。

④ 料金所部【交通集中渋滞の約 1%】

料金所での一旦停止に伴い、一時的な交通容量の不足により渋滞が起こる。

⑤ その他【交通集中渋滞の約 23%】

インターチェンジ合流部や料金所部で交通が集中し、渋滞が発生するのは、車線が減ることや料金所で一時停車しなければならないためである。つまり必ずしも運転手にその原因があるとは言えない。一方で、サグ部やトンネル入り口部で渋滞が発生するのは、下り坂から上り坂になるときに、知らず知らずのうちに速度低下してしまうことや、トンネル入り口部の暗がりや圧迫感により、一時的に速度が低下してしまうことなどが原因である。つまり運転手の不注意や心理的な要因が大きい。よって、こういったタイプの交通集中渋滞（交通集中渋滞の約 78%）は、もし、運転手が最適な運転ができていれば解消することができる。

2-3. 事故渋滞の原因

次に事故渋滞の状況と原因を示す。

表 2-1 に示されているように、平成 25 年の交通事故発生件数は 629,021 件だった。表 2-2 によると、そのうち運転手に何らかの過失があったのは 596,649 件である。つまり交通事故の原因の 95%が運転手に何らかの問題があった。このデータから推測できることは、もし人間が運転しなければ、ほとんどの交通事故が無くなるということである。自動運転が普及することでそれを実現できる可能性がある。

表 2-1 平成 25 年中の交通事故の発生状況

		構成比
発生件数(件)	62 万 9,021	100.0%
死亡事故	4,278	0.70%
重傷事故	4 万 2,361	6.7%
軽傷事故	58 万 2,382	92.6%
		構成比
死傷者数(人)	78 万 5,867	100.0%
死者数	4,373	0.6%
負傷者数	78 万 1,494	99.4%

出典：交通事故発生状況（警視庁）

表 2-2 平成 25 年中の原付以上運転者（第 1 当事者）の法令違反別交通事故件数（上位 10 位）

安全不確認	182,374
脇見運転	100,400
動静不注視	68,032
漫然運転	47,281
運転操作不適	42,111
交差点安全進行	40,068
一時不停止	24,221
信号無視	16,720
歩行者妨害	13,616
優先通行妨害	12,407
合計	596,649

出典：交通事故発生状況（警視庁）

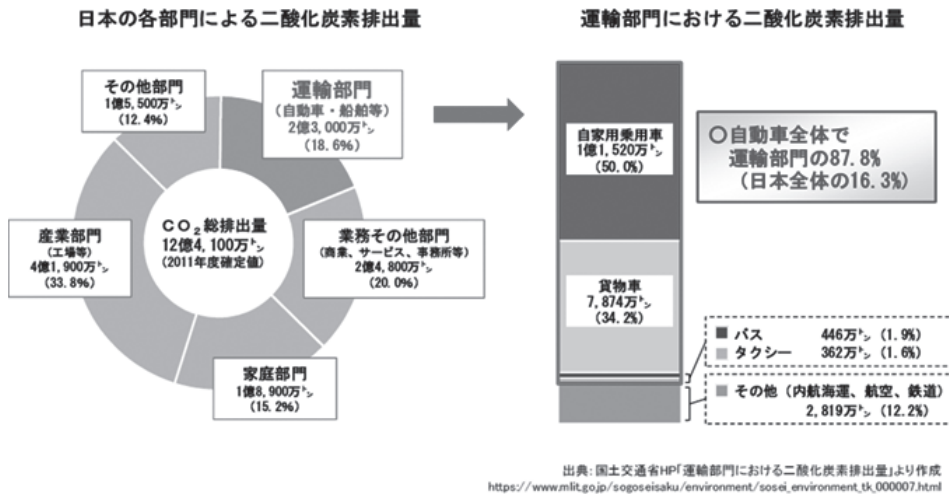


図3-1 各部門による二酸化炭素排出量

出典：国土交通省「検討課題の整理」

3. 自動運転で見込める経済効果

3-1. 環境面

図3-1から、日本の二酸化炭素排出量のうち、運輸部門からの排出量は18.6%である。また、その運輸部門の排出量のうち、87.8%（日本全体の16.3%）が自動車からの排出である。もし自動運転により渋滞が緩和されるならば、日本全体でのCO₂削減に貢献ができると思われる。

エネルギーの節約という点では、高速道路における隊列走行実験では10%以上の燃費改善効果があることが確認されている。NEDOのエネルギーITS推進プロジェクトが、隊列を形成した複数のトラックの操舵制御と速度制御による自動運転・隊列走行等の実験を行ったところ、技術の高度化により、大型トラック3台で時速80km、車間4mの隊列走行を実現することに成功した。実用化が進めば、将来的に15%以上の省エネルギー効果が期待できる。

このように、自動運転の実現により、不要な加減速の低減、空気抵抗の低減、渋滞の抑制等による燃費向上やCO₂の削減効果が期待される。

3-2. 経済面

自動運転技術は、2つの面で経済効果が期待されている。1点目に事故、渋滞解消により今までに失われていた時間、コストが解消すること、2点目に自動運転技術を搭載した自動車の生産によって新たな雇用や需要の発生による経済効果である。

1点目に関して、第2節でも述べたように渋滞による経済損失額は約12兆円にのぼる。また自動車事故による損失は、内閣府の「平成23年度交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査報告書」によれば、表3-1に示すように、年間約6兆3340億円（平成23年度の推計値。慰謝料を含む）となっている。国内での自動車事故の9割以上が人為的ミスによって発生している事故であるため、自動運転が普及することで人為的交通事故が減ればこれらの損失額も減少すると考えることができる。

表3-1 平成23年度の事故損失額

単位: 十億円

内訳項目		死亡	後遺障害	傷害	物損	合計	
金銭的 損失	人的 損失	逸失利益・治療関係費・葬祭費	114	428	290	—	832
		慰謝料 [A]	87	100	340	—	527
		小計	201	528	630	—	1,359
	物的損失		3	26	433	1,249	1,711
	事業主体の損失		6	14	61	—	81
	各種公的機関等の損失		14	82	712	20	828
金銭的損失合計 [B]		223	649	1,837	1,269	3,979	
非金銭的 損失	死傷損失 [C]		1,509	577	269	—	2,355
総計（慰謝料分除外）[B]-[A]+[C]		1,646	1,126	1,766	1,269	5,807	
総計（慰謝料分除外せず）[B]+[C]		1,733	1,226	2,106	1,269	6,334	

注1) 死傷損失の値は「表 5-17 非金銭的損失額の全容」の死傷損失額による。なお、「後遺障害」は負傷QからOの合計、「傷害」は負傷Aの値である。

注2) 四捨五入のため、各集計欄の値は必ずしも各欄の集計結果と一致しない。

出典：平成23年度交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査報告書

表3-2 自動運転車の普及によって減少する事故数と経済効果

	10%	50%	90%
Crash Cost Savings from AVs			
Lives Saved (per year)	1,100	9,600	21,700
Fewer Crashes	211,000	1,880,000	4,220,000
Economic Cost Savings	\$5.5 B	\$48.8 B	\$109.7 B
Comprehensive Cost Savings	\$17.7 B	\$158.1 B	\$355.4 B
Economic Cost Savings per AV	\$430	\$770	\$960
Comprehensive Cost Savings per AV	\$1,390	\$2,480	\$3,100
Congestion Benefits			
Travel Time Savings (M Hours)	756	1680	2772
Fuel Savings (M Gallons)	102	224	724
Total Savings	\$16.8 B	\$37.4 B	\$63.0 B
Savings per AV	\$1,320	\$590	\$550

出典：Preparing a Nation for Autonomous Vehicles.

次の表3-2は、自動運転車の普及による事故件数と死亡者数の減少を予想したものである（Eco Center for Transportation 2013）。内閣府のデータによると2012年度のアメリカ合衆国での死亡者数は3億3561人であり70%自動運転車が普及すると自動車事故が422億件減少、2億1700人の命が救われると記載されており、70%以上の人命が救われる試算となる。

さらに市場面では、自動運転技術の革新によって新たな市場が生まれるのではないかと期待も高まっている。2015年に行われた調査によると、次ページの図3-2、3-3に示されているように、日本人消費者1500人以上のうち、部分自動運転車の購入意向のある消費者が47%、完全自動運転車の購入意向のある消費者が44%であった（ボストン・コンサルティング2015）。

また同調査によると、アメリカと比較して、日本は年代ごとに購入意向の差が少なく、また高齢者の購入意向車の数値が高い（図3-4、3-5を参照。ただし、図3-2、3-3の内、「どちらかと言えば購入したい」、「是非購入したい」を選択した人による回答である）。このことから自動運転の安全性、信頼性をPRしていくことで、今後高齢化社会が急速に進行する中、移動手段に自動車を使用したい高齢者のニーズと合致するのではないだろうか。

4. モデル分析

4-1. モデル

以上、自動運転車が社会にもたらす様々な価値を見てきた。事故軽減や環境保全、そして時間節約など、自動運転は様々な価値を社会にもたらす。そこで重要な課題は、自動運転車をいかに普及させていくかである。普及のための政策の必要性の有無、普及に効果的な政策のあり方について、以下では、離散選択モデルを用いて分析する。

(1) 記号の定義

t : 時間 (年)

n : 自動車の総数 (一定と仮定)

s_t : 非自動運転車のシェア。ただし $s_0 = 1$ とする。

j : クルマのタイプ。ただし自動運転車 $j = A$ 、非自動運転車 $j = N$ とする。

i : 事故の種類。以下の3パターンに分類する。クルマ対クルマ $i = 1$ 、クルマ対人 $i = 2$ 、クルマ対クルマ以外のもの $i = 3$

$\bar{p}_i(s_t, j)$: 事故を起こす/事故にあう確率

$\pi_{i,d}, \pi_{i,s}, \pi_{i,m}$: 事故 i が死亡事故 death、重傷事故 serious、軽傷事故 minor である条

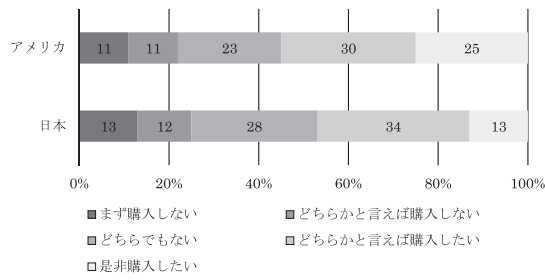


図 3-2 部分自動運転車の購入意向（日本・米国）

出典：ボストン・コンサルティング

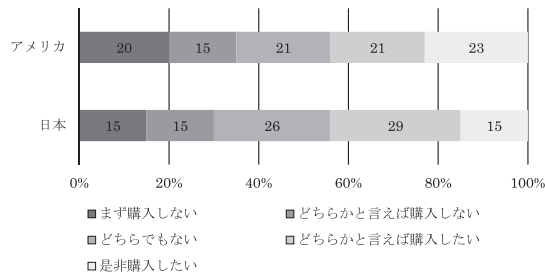


図 3-3 完全自動運転車の購入意向（日本・米国）

出典：ボストン・コンサルティング

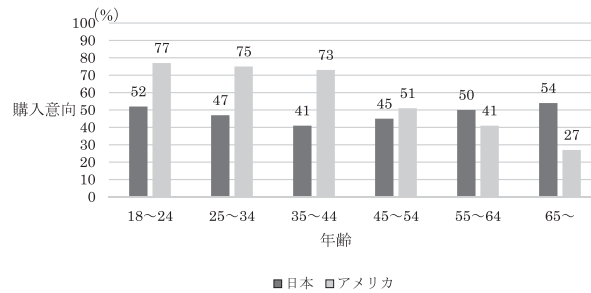


図 3-4 部分的自動運転車の購入意向（年齢層別、日本・米国）

出典：ボストン・コンサルティング

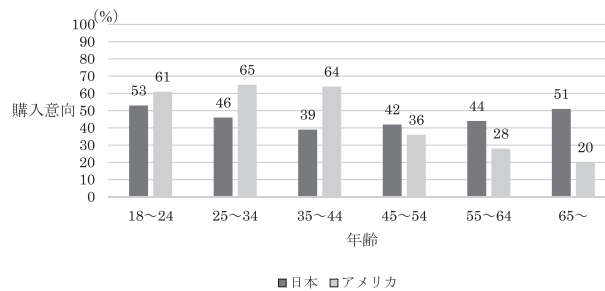


図 3-5 完全自動運転車の購入意向（年齢層別、日本・米国）

出典：ボストン・コンサルティング

件付確率

D_d, D_s, D_m : 死亡事故、重傷事故、軽傷事故による社会的損害額

rD_d, rD_s, rD_m : 同個人的損害額（自らが被害にあう場合の確率を r とする）

渋滞による時間のロスと大気汚染物質（温室効果ガスを含む）の排出増を以下のように定義する。

$q_h(ns_t)$: 渋滞による損失時間

D_h : 単位時間当たり社会的損失額

$q_a(ns_t)$: 大気汚染物質排出量

D_a : 単位汚染当たり社会的損失額

(2) モデル I : 自由放任経路

ここでは、離散選択モデルを利用する。中でも、二択の選択肢を比較し、より効用の高い選択肢を選択する「二項ロジットモデル」を用いる。具体的には、自動運転車から得られる効用（年間当たりのフローで表現される）が、非自動運転車から得られる効用を超えるならば、個人は自動運転車に買い替える。ただしその効用は確率的に変動する⁵⁾。

●非自動運転車から得られる効用 ($j=N$)

$$V^N(s_t) = u - \sum_{i=1,2,3} r \left(\sum_{k=d,s,m} D_k \pi_{ik} \right) \bar{p}_i(s_t, N) - I_N - D_h q_h(ns_t) + \varepsilon_N \quad (1)$$

ここで u はクルマの（維持費用等を差し引いた）純便益、 I_N は非自動運転車の保険料金、 ε_N は確率項で期待値はゼロ ($E[\varepsilon_N] = 0$)。

●自動運転車から得られる効用 ($j=A$)

$$V^A(s_t) = u - c - \sum_{i=1,2,3} r \left(\sum_{k=d,s,m} D_k \pi_{ik} \right) \bar{p}_i(s_t, A) - I_A - D_h q_h(ns_t) + \varepsilon_A \quad (2)$$

ここで c は一年あたりの自動運転車の（購入費が割高なことによる）追加的なコスト、 I_A は自動運転車の保険料金、 ε_A は確率項で期待値はゼロ ($E[\varepsilon_A] = 0$)。

●ある個人が t 時点で自動運転車に切り替える確率 $\text{pr}(\cdot)$

$$\begin{aligned} & \Pr(V^A(s_t) - V^N(s_t) > 0) \\ &= \Pr \left[-c + \sum_{i=1,2,3} r \bar{D} (\bar{p}_i(s_t, N) - \bar{p}_i(s_t, A)) + (I_N - I_A) > \varepsilon \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{D} = \sum_{k=d,s,m} D_k \pi_{ik}$ 、 $\varepsilon = \varepsilon_N - \varepsilon_A$ 。交通渋滞の不効用の大きさ $D_h q_h(ns_t)$ は自分のクルマが自動運転車であるかないかに関わらないので (3) の右辺では消去されている。なお

$$\sum_{i=1,2,3} r \bar{D} (\bar{p}_i(s_t, N) - \bar{p}_i(s_t, A)) = r \bar{D} \left(\frac{s_t p_1}{2} + p_2 + p_3 \right) \quad (4)$$

と整理される。ここで p_1 は車対車の事故を起こす確率または遭う確率を表す。自動運転車では車対車の事故のみが発生し、その発生確率は非自動運転車の 1/2 と仮定する。なぜなら事故は双方が原因で発生し得るが自動運転車の場合は自らが事故を起こすことはないからである。

$$x(s_t) = -c + \sum_{i=1,2,3} r\bar{D}(\bar{p}_i(s_t, N) - \bar{p}_i(s_t, A)) + (I_N - I_A) \quad (5)$$

と表し、 ε が第 1 種極値分布にしたがうと仮定すると、自動運転車に切り替える確率は次で与えられる。

$$\Pr(V^A(s_t) - V^N(s_t) > 0) = \frac{\exp x(s_t)}{1 + \exp x(s_t)} \quad (6)$$

したがって t 時点で $s_t n$ 台の非自動運転車から、 $s_t n \exp x(s_t) / (1 + \exp x(s_t))$ 台が自動運転車に切り替わる。その結果、次の時点での非自動運転車のシェアは

$$s_{t+1} = \frac{1}{n} \left(s_t n - \frac{s_t n \exp x(s_t)}{1 + \exp x(s_t)} \right) = \frac{s_t}{1 + \exp x(s_t)} \quad (7)$$

で表される。 $s_0 = 1$ と (7) から非自動運転車のシェアの推移が計算できる。(7) によって得られる非自動運転車のシェアの推移を自由放任経路と定義する。

(3) モデル II : 社会最適経路

ここでは上で見た各効用に、自動運転車を採用することで社会に与える便益（節約された限界社会的費用）として、 $n \sum_{l=h,a} D_l q_l'(ns_t)$ を、自動運転車に切り替える場合の効用に加える。ここで h は渋滞による外部不経済、 a は二酸化炭素の排出による外部不経済を表す。一方で、保険支払いを除く。これはそれが社会的には所得移転に過ぎないためである。

以上の修正によって、社会的費用を考慮した個人の選択問題を考えることができる。そうした選択から得られる非自動運転車のシェアの推移を社会的に最適な経路（社会最適経路）と見なす。

- 非自動運転車から得られる社会的便益 ($j=N$)

$$V^N(s_t) = u - \sum_{i=1,2,3} r \left(\sum_{k=d,s,m} D_k \pi_{ik} \right) \bar{p}_i(s_t, N) - \sum_{l=h,a} D_l q_l'(ns_t) + \varepsilon_N \quad (8)$$

- 自動運転車から得られる社会的便益 ($j=A$)

$$V^A(s_t) = u - c - \sum_{i=1,2,3} r \left(\sum_{k=d,s,m} D_k \pi_{ik} \right) \bar{p}_i(s_t, A) - \sum_{l=h,a} (D_l q_l'(ns_t) - n D_l q_l'(ns_t)) + \varepsilon_A \quad (9)$$

上と同じ確率項に関する仮定の下で、自動運転車への切り替え確率は次で与えられる。

$$\Pr(V^{A^*}(s_t) - V^{N^*}(s_t) > 0) = \frac{\exp x^*(s_t)}{1 + \exp x^*(s_t)} \tag{10}$$

ただし

$$x^*(s_t) = -c + \sum_{i=1,2,3} r\bar{D}(\bar{p}_i(s_t, N) - \bar{p}_i(s_t, A)) + \sum_{l=h,a} nD_l q_l(ns_t) \tag{11}$$

したがって、最適普及経路は非自動運転車のシェア s_t^* で表現して

$$s_{t+1}^* = \frac{1}{n} \left(s_t^* n - \frac{s_t^* n \exp x^*(s_t^*)}{1 + \exp x^*(s_t^*)} \right) = \frac{s_t^*}{1 + \exp x^*(s_t^*)} \tag{12}$$

で与えられる。

(12) によって得られる非自動運転車のシェアの推移を社会最適経路と定義する。

(4) 各数値の設定

式 (7)、(12) を用いて具体的に非自動運転車のシェアを算出するために必要な数値を設定する。

① D_d, D_s, D_m について

自賠責保険および対人賠償保険に係るデータによる被害者の治療関係費、慰謝料、休業損害、逸失利益等の合計を用いた。過失等による減額を考慮する前の損害認定実額で、保険金の支払額とは必ずしも一致しない。

人的損害額の内訳は以下のようなものである。

表 4-1 平成 24 年の交通事故被害者数

死傷者数(人)	82 万 9,807
死亡者	4,401
重傷者	4 万 6,665
軽傷者	73 万 8,731

出典：交通事故発生状況（警視庁）

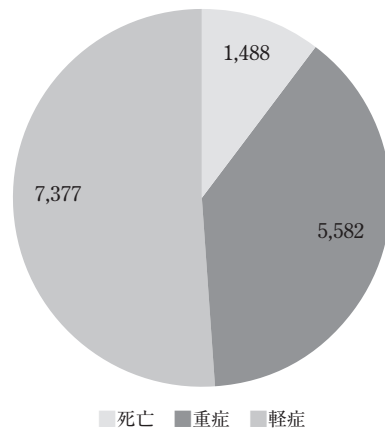


図 4-1 平成 24 年人的損失額の内訳 (億円)

出典：日本損害保険協会『自動車保険データに見る交通事故の経済的損失状況』

表 4-1、図 4-1 から、死亡、重症、軽傷の事故が発生した時、一回あたりいくらの社会

的損失が発生するのかを算出する。

$$D_d = \frac{148,800,000,000 \text{ (円)}}{4,401 \text{ (人)}} = 33,810,498 \text{円}$$

$$D_s = \frac{558,200,000,000 \text{ (円)}}{46,665 \text{ (人)}} = 11,961,856 \text{円}$$

$$D_m = \frac{737,700,000,000 \text{ (円)}}{738,731 \text{ (人)}} = 998,604 \text{円}$$

(すべて小数点第1位以下四捨五入)

② $\pi_{i,d}, \pi_{i,s}, \pi_{i,m}$ について

それぞれの事故の種類 i における事故が起こった時のその事故の深刻さに関する条件付確率 π_d, π_s, π_m を、警視庁交通局による「平成 25 年中の交通事故の発生状況」から求める。方法として、平成 25 年度に発生した交通事故のうち、まず $i=1, 2, 3$ がそれぞれ発生する確率を求めた。さらにその事故が発生した時に死亡事故 (d)、重傷事故 (s)、軽傷事故 (m) のどの規模の事故になるのかという確率を求めた。これら二つの確率を乗じること、 $\pi_{i,d}, \pi_{i,s}, \pi_{i,m}$ が表 4-2 のように算出される。

表 4-2

	π_1 (車対車)	π_2 (車対人)	π_3 (車単独)
d (死亡事故)	0.002601	0.0023712	0.001584
s (重傷事故)	0.0048	0.0150624	0.00864
m (軽傷事故)	0.821916	0.0785856	0.025416

出典：平成 25 年度交通事故発生状況（警視庁）

③ $n \sum_{l=h, a} D_h q_h^l(ns_t)$ について

まず非自動運転車 1 台が生み出す限界時間損失額 $nD_h q_h^l(ns_t)$ だが、次のように推計した。国土交通省の「効果的な渋滞対策の推進」によると全国で年間に発生する渋滞損失は約 38.1 億人時間、貨幣価値換算すると約 12 兆円にも上ると言われている。また日本の総自動車台数が 75,020,759 台なので、以上のことから 1 台非自動運転車が増えることによって年間で、 $12,000,000,000,000/75,020,759 = 159,956$ 円の渋滞損失が生じると考える。この値は時給に直すと約 2000 円となりかなり高額である。さらにレジャー等の移動に利用している場合を含むことも考慮して、控えめな値として、Cesario (1976) にしたがって $1/3$ を乗じた値を用いることにした。よってここでは

$$n \sum_{l=h} D_h q_h^l(ns_t) = 53,318$$

とする。

次に $nD_a q'_a(ns_t)$ だが、2014年の家計部門の自動車台数が70,739,930台、2014年における家計部門の自動車からのCO2排出量が65,550,000トンであることから、家計部門の自動車から年間で0.926633657トン/台のCO2が排出されているとわかる。これに経済産業省が炭素1t当たりの回収コストとして定義している1万600円⁶⁾を乗じる。ただし、この金額は炭素1t当たりの金額なので、これに12/44を乗じたものがCO2の価値となる。つまりCO2の価値である2890円に、家計部門の自動車からの年間CO2排出量である0.926633657トン/台を乗じる。よって、

$$n \sum_{i=a} D_a q'_a(ns_t) = 2,677$$

とする。

④ $\bar{p}_i(s_t, j), j=N, A$ について

本論文では $j=A$ の時、 $i=1$ のパターンの事故のみ発生するとする。すなわち自動運転車ではクルマ対クルマの事故のみが発生する。その発生確率は非自動運転車の1/2と仮定する。なぜなら事故は双方が原因で発生し得るが自動運転車の場合は自らが事故を起こすことはないからである。以上より、次の関係が得られる。

$$2\bar{p}_1(s_t, A) = \bar{p}_1(s_t, N) = s_t p_1$$

$$\bar{p}_2(s_t, A) = 0, \bar{p}_2(s_t, N) = p_2$$

$$\bar{p}_3(s_t, A) = 0, \bar{p}_3(s_t, N) = p_3$$

ここで p_1, p_2, p_3 は定数である。

⑤ $I_j, j=N, A$

保険料 I_j については現状、自動運転車であるかないかにかかわらず、保険料金に変化がないことから、 $I_N = I_A$ とする。

⑥ ε の分散について

ε の分散については、自動車の効用が random utility 理論の枠組みでどのように変動するかによって決まるが、そうした推定結果を明示した文献を見つけることができなかった。このためここでは現実的なシミュレーション結果を得られるものを選ぶことにした。いくつかの数値を試した結果、 $\varepsilon=10,000$ を採用することにした。

4-2. シミュレーション結果

まず日本の新車買い替えが平均して7年から8年のスパンで行われているということ considering、社会最適経路において10年間で自動運転車を完全普及させる ($s_{10}^* = 0$) ための c を求めたのが図4-2である。

社会最適経路においては $c=383000$ の時に $s_{10}^* = 0$ となることが分かる。なお、 c は年間で自動運転装置にかかるコストを表す。

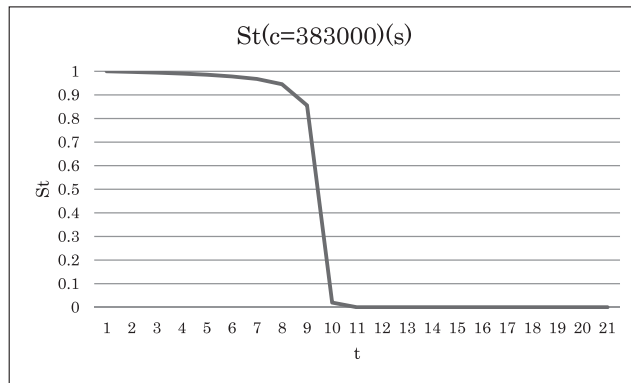


図 4-2 社会最適経路での $c=383,000$ における非自動運転車の普及推移
注：(s) は社会的最適経路を示す。以下同じ。

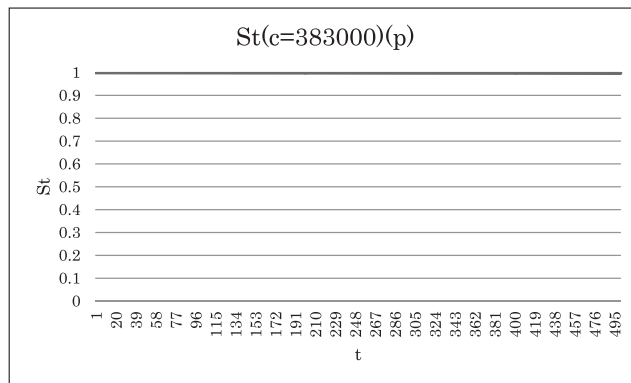


図 4-3 自由放任経路での $c=383,000$ における非自動運転車の普及推移
注：(p) は自由放任経路を示す。以下同じ。

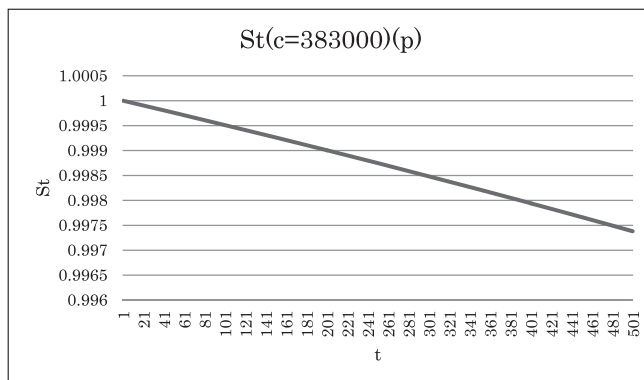


図 4-4 自由放任経路での $c=383,000$ における非自動運転車の普及推移

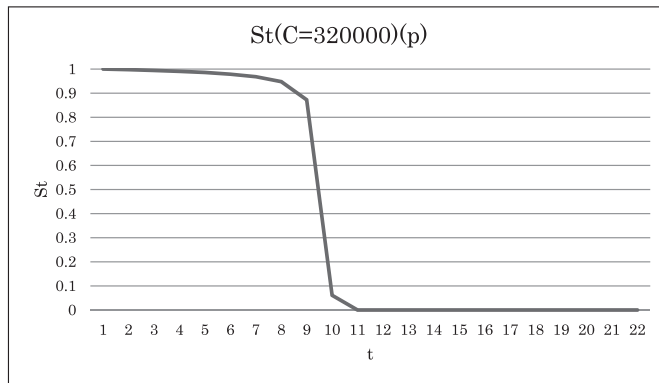


図 4-5 自由放任経路での $c=320000$ における非自動運転車の普及推移

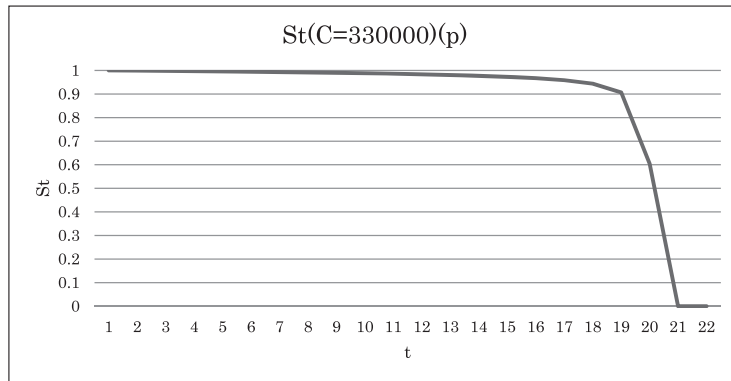


図 4-6 自由放任経路での $c=330000$ における非自動運転車の普及推移

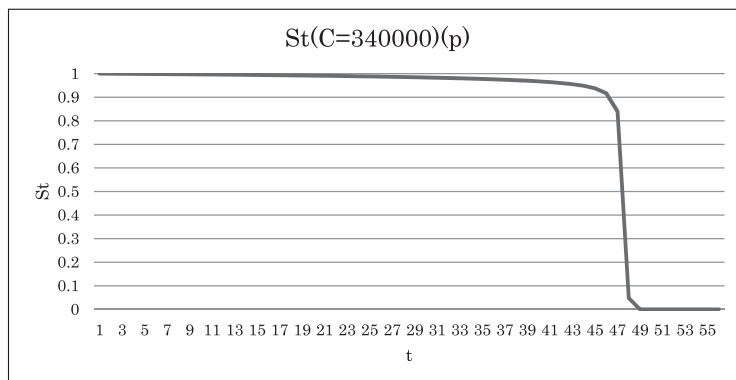


図 4-7 自由放任経路での $c=340000$ における非自動運転車の普及推移

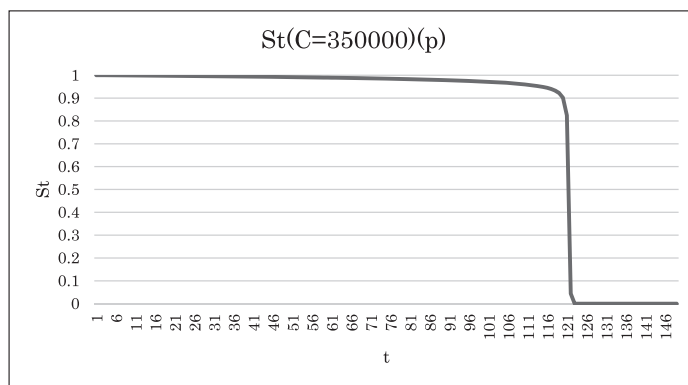


図 4-8 自由放任経路での $c=350000$ における非自動運転車の普及推移

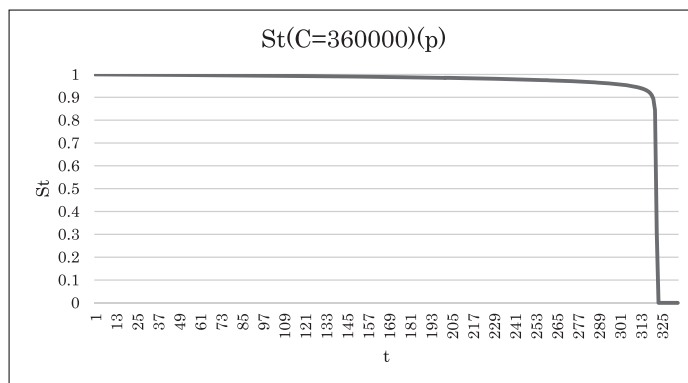


図 4-9 自由放任経路での $c=360000$ における非自動運転車の普及推移

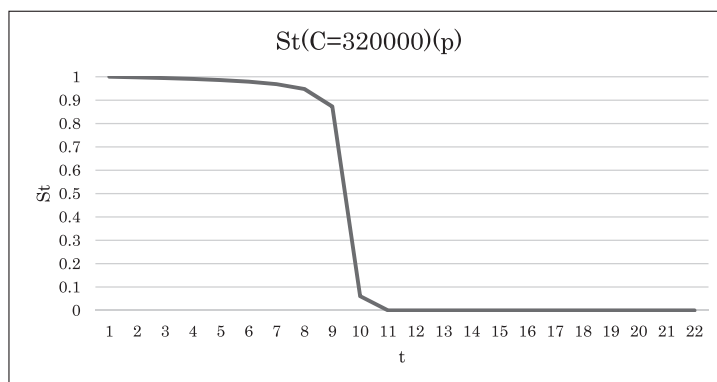


図 4-10 自由放任経路での $c=320000$ における非自動運転車の普及推移

一方、自由放任経路で、 $c=383000$ とした時の s_t は図4-3、4-4のような結果になった。

図4-3では500年間近く自動運転車は普及しないことが示されている。図4-4は目盛を変えて推移を示したものである。これより、自動運転車は全く普及しないわけではないが、極めてわずかしこ普及しないことがわかる。

以上のように、社会最適経路においては $c=383000$ の時 $s_{10}^*=0$ となったが、自由放任経路においては、この価格ではほとんど普及しないことが分かる。そこで、自由放任経路において10年以内に自動運転車のシェアを100%までに普及させる($s_t=0$)ための c を求めたのが、図4-5である。

以上の結果から、 $s_{10}=0$ となるためには社会最適経路では $c=383000$ 、自由放任経路では $c=320000$ 以下になる必要があるとわかる。よってこの社会最適経路と自由放任経路の間に存在する $c=63000$ のギャップを補助金等で埋める必要がある。

また、社会最適経路は、個人が自らの効用だけでなく、社会全体の効用も考慮したモデルなので、今回明らかとなった $c=383000$ という価格は10年以内に自動運転車のシェアを100%にする際の自動運転装置の最高価格であると考えられる。

自由放任経路においてさらに c の値を $c=320000$ から360000まで変化させたのが以下のグラフである。

図4-6、7、8、9から、 c の値が $c=320000$ から10000ずつ上がることで、完全普及するために要する年数 t が指数関数的に増加していることが分かる。このことから適切な補助金額を支給することが自動運転車の普及に必要であると言える。

分析の最後に次の点を指摘しておく。各表の普及曲線の軌跡を見ると、すべてのシミュレーションにおいて、ある時点で急激に自動運転車が普及していることが分かる。

例えば図4-10では $t=1\sim 9$ までは自動運転車はほとんど普及していない。しかし $t=9\sim 10$ では s_t が急激に下がり自動運転車が急速に普及している。これは、自動運転車の普及に関して、購買者間に相互依存性があるからだと考えられる。自動運転車のシェアがわずかな時は、自動運転車の持つ安全性や最適性が十分発揮されないので、購買者が自動運転車を購入した場合の効用が低い。しかし、自動運転車のシェアが徐々に増加することで、購買者が自動運転車から得られる効用が高くなり、一定以上の効用が得られたタイミングで自動運転車のシェアが急激に増加するからだと考えられる。

5. 本研究の要約と課題

本研究では離散選択モデルを用いて、自動運転車の普及推移をシミュレーションした。その結果として

- ① 社会最適経路と自由放任経路の間に存在する金銭的ギャップを補う必要性
- ② 金銭的ギャップを補う際に、適切な補助金額を支給することの重要性
- ③ 購買者間に存在する相互依存性

が示された。

今後の課題としては、今回、個人の効用を決定する要因としなかった「物的損失」にまで研究の範囲を広げることである。この研究では主に交通事故による「人的損失」を中心に個人の効用が決定するモデルを用いたが、「物的損失」も考慮することでより正確なシミュレーションが行えると考える。

また、社会最適経路の導出で用いた限界社会的費用は、自動運転車のシェアに応じて変化すると考えるのが自然だが、今回の研究では限界社会費用を一定として数値を推計し利用した。これは信頼できるデータがなかったためであるが、自動運転車のシェアと、渋滞量や汚染物質排出量の相関関係を明らかにしたうえで、それらの関係性を考慮したモデルにすることもまた、今後の課題である。

注

- 1) 人と道路と自動車の間で情報の受発信を行い、道路交通が抱える事故や渋滞、環境対策など、様々な課題を解決するためのシステム。
- 2) 以下の国内外の状況は『国内外における最近の自動運転の実現に向けた取組概要』を参考にした。
- 3) NEXCO 西日本による。
- 4) 分類、解説及び数値は NEXCO 西日本による。
- 5) ここでのモデルは random utility model と呼ばれるものの一種である。同モデルについては、たとえば依田 (2007, 第4章) を参照。
- 6) 国土交通省「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針」

引用文献

- [1] エネルギーITS推進事業成果報告会『自動運転システム展望と課題』<http://www.nedo.go.jp/content/100521777.pdf> (アクセス 2015/11/30)
- [2] 科学技術動向研究センター『自動運転自動車の研究開発動向と実現への課題』<http://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-STT133J-1.pdf> (アクセス 2015/10/4)
- [3] 警視庁『平成 25 年中の交通事故の発生状況』<http://www.keishicho.metro.tokyo.jp/anzen/sub5.htm> (アクセス 2015/10/4)
- [4] 警察庁交通局運転免許課『運転免許統計 平成 25 年版』https://www.npa.go.jp/toukei/menkyo/pdf/h25_main.pdf (アクセス 2015/10/4)
- [5] 国土交通省『国内外における 最近の自動運転の実現に向けた取組概要』<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/autopilot/pdf/04/8.pdf> (アクセス 2015/11/16)
- [6] 国土交通省『検討課題の整理』<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/autopilot/pdf/05/2.pdf> (アクセス 2015/11/6)
- [7] 国土交通省『公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針』<http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha04/13/130206/04.pdf> (アクセス 2015/11/4)
- [8] 津川定之 (2013)『自動運転システムの展望』<http://www.iatss.or.jp/common/pdf/publication/iatss-review/37-3-06.pdf> (アクセス 2015/12/5)

- [9] 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』http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf (アクセス 2015/12/2)
- [10] 羽鳥剛史・小林木潔司『ETCシステムの普及と金銭的外部性』https://www.jsce.or.jp/library/open/proc/maglist2/00039/200411_no30/pdf/115.pdf (アクセス 2015/10/5)
- [11] ポストン・コンサルティング『自動運転車の購入意向:新車購入の可能性がある消費者の4~5割に(日本における調査)』<http://www.bcg.co.jp/documents/file196359.pdf> (アクセス 2015/11/4)
- [12] 本田技術研究所 四輪R&Dセンター『「自動運転」が拓く未来。』<http://www.honda.co.jp/sustainability/report/pdf/2015/Honda-SR-2015-jp-013.pdf> (アクセス 2015/12/2)
- [13] 依田高典(2007)『ブロードバンド・エコノミクス—情報通信産業の新しい競争政策』日本経済新聞出版社
- [14] Cesario, F.J. (1976) "Value of time in recreation benefit studies." *Land Economics* 52: 32-41
- [15] Engadget 日本版『Google、自動運転車の正式プロトタイプを初公開。顔つきがやや真面目に』<http://japanese.engadget.com/2014/12/22/google-self/> (アクセス 2015/11/24)
- [16] HONDA ホームページ『Honda サステナビリティ|安全|テクノロジー(安全技術)』<http://www.honda.co.jp/sustainability/safety/technology/> (アクセス 2015/11/20)
- [17] ITmedia『Google Carの自動運転技術大解剖』<http://www.atmarkit.co.jp/ait/articles/1505/29/news024.html> (アクセス 2015/12/5)
- [18] NATIONAL GEOGRAPHIC 日本版『自動運転タクシーで温室効果ガス94%減、米研究』<http://natgeo.nikkeibp.co.jp/atcl/news/15/070800176/> (アクセス 2015/12/22)
- [19] NEDO 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構『大型トラックの自動運転・隊列走行実験に成功—エネルギーITSプロジェクトの事業成果を公開—』http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100178.html (アクセス 2015/11/23)
- [20] NEXCO 西日本ホームページ『渋滞原因解説』http://www.w-nexco.co.jp/traffic_info/trafficjam-comment/index2.html (アクセス 2015/10/23)
- [21] NEXCO 東日本 コーポレートサイトホームページ『道路管理運営事業』http://www.e-nexco.co.jp/activity/safety/detail_07.html (アクセス 2015/10/4)
- [22] Wikipedia『フューチャラマ』<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%83%81%E3%83%A5%E3%83%A9%E3%83%9E> (アクセス 2015/11/24)
- [23] Wikipedia『Google ドライバーレスカー』https://ja.wikipedia.org/wiki/Google_%E3%83%89%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%90%E3%83%BC%E3%83%AC%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%83%BC (アクセス 2015/11/24)

