自動走行システムの経済的特色と普及のための政策

客員研究員（同志社大学総合政策科学研究科）
三好　博昭

1.　概要

本稿は、自動走行システムの経済的な性質を明らかにした上で、自動走行システムの装備義務化政策の効果を、追突防止技術を例に分析したものである。

本稿の構成は、以下の通りである。まず2.では、本稿で利用したデータについて解説する。3.では、自動走行システムの便益を論じる上での基礎的な情報整理として、平成4年以降の交通事故損失の経年変化の要因分析を行い、技術の果たしてきた役割を確認する。4.では、「自律型」、「車々協調型」、「路車協調型」という自動走行の３つのシステム方式の経済的な性質を整理する。そして、5.では、追突事故防止技術を対象に、「自律型」「車車協調型」それぞれの装備義務化政策の効果について論じる。

2.データ

本稿の分析で利用したデータは以下の通りである。

2.1. 交通事故被害者１人あたりの損失額

表1は、内閣府（2012）で計算された2009年の日本の交通事故損失額と、被害者1名あたりの損失額を示している。これによると、2009年の交通事故による損失総額は総額6.3兆円である。損失額は、大きく金銭によって補償が可能な金銭的損失と、非金銭的損失に分けて推計されており、前者が約4兆円、後者が2.4兆円となっている。ここでいう非金銭的損失とは、事故被害者の肉体的・精神的な苦しみ等を意味し、内閣府（2012）では、表2に示した非金銭的損失の5つのカテゴリーの内、被害者本人の非金銭的損失を対象として、損失額を推計している。

一方、１人あたりの損失額は、内閣府（2012）では、「死亡」、「後遺障害」、「傷害」が、それぞれ2億4,452万円、1,826万円、186万円と推計している。本稿では、内閣府（2012）で設定された人身損傷程度別の被害者1名当たりの損失額を、GDPデフレータを用いて2015年値に調整して利用している。ただし、内閣府　(2012）では、被害の程度を「死亡」「後遺障害」「傷害」に分類しているのに対し、ITARDAの『交通事故統合データ（マクロデータ）　』の人身損傷程度は、「死亡」「重傷」「軽傷」の別であり、内閣府（2012）とは区分が異なる。本稿では、ITARDAの『交通事故統合データ（マクロデータ）　』の「重傷」と「軽傷」は、それぞれ内閣府（2012）の「後遺障害」と「傷害」に相当すると仮定して損失額と便益の計算を行う。表3は、本稿で利用する人身損傷程度別の損失額を示したものである。

表１ 交通事故による損失額 (2009)

			損失額（１０億円）					被害者１名あたりの損失額（千円）		
			死亡	後遺障害	傷害	物損	合計	死亡	後遺障害	傷害
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	16,025	6,379	256
		慰謝料	87	100	340	-	527	12,290	1,485	300
		小計	201	528	630	-	1,359	28,315	7,864	555
	物的損失		3	26	433	1,249	1,711	382	382	382
	事業主体の損失		6	14	61	-	81	797	207	54
	各種公的機関の損失		14	82	712	20	828	2,025	1,214	628
	金銭的損失合計		223	649	1,837	1,269	3,979	31,518	9,667	1,619
非金銭的損失	死傷損失		1,509	577	269	-	2,355	213,000	8,587	237
総計（慰謝料分除外）			1,646	1,126	1,766	1,269	5,807	232,228	16,769	1,557
総計（慰謝料分除外せず）			1,733	1,226	2,106	1,269	6,334	244,518	18,254	1,856

出所） 内閣府（2012） 表6-1と表6-4から作成。

表２ 非金銭的損失の分類

主体	内容
被害者本人	自分自身が交通事故に遭うことで被る痛み、苦しみなど
被害者の家族及び友人	被害者が交通事故に遭うことを通じて被る悲しみなど
加害者本人	交通事故を起こしたことによる加害者の信用低下や失職などを通じて被る生活の質の低下など
加害者の家族及び友人	加害者が交通事故を起こしたことを通じて被る悲しみなど
第三者	交通事故が起きたという情報を通じて感じる悲しみなど

出所）内閣府（2012） p. 17の定義。

表３ 人身損傷程度別の損失額

交通事故統合データの人身損傷程度		対応させた内閣府(2012)の区分	被害者１名あたり損失額（万円）
死亡	→	死亡	24,145
重傷	→	後遺障害	1,802
軽傷	→	傷害	183

出所）内閣府（2012） 表6-4の数値にGDPデフレータを乗じて平成27年貨幣価値に換算。

2.2. 走行キロ、自動車保有車両数、交通事故数並びに人身損傷程度別被害者数

車種別の総走行キロについては、国土交通省『自動車輸送統計月報』の数値を用いた。車種別の自動車保有車両数については、一般財団法人自動車検査登録情報協会の『自動車保有車両数月報』と個別統計データを用いた。交通事故数並びに人身損傷程度別被害者数については『交通事故統合データ（マクロデータ）』（死者数は24時間死者数）を用いた。

2.3. 自動車の平均使用年数

自動走行システムによってもたらされる便益を計測する場合、システムを装備した車が何年間利用されるかが、便益額の重要な決定要因となる。ここでは、自動車の車種別の平均使用年数を表4の通り設定して便益の計算を行った。

これらの数値は、佐野(2006)を参考に、新車登録以降経過年毎の廃車率がワイブル分布にしたがうとの仮定の下、2015年の自動車保有台数と過去40年の新車登録台数からワイブル分布のパラメータを算出し、その値から計算したものである。ただし、事業用普通・小型乗用車（タクシー）の平均使用年数は、業界ヒアリング等に基づき設定した。なお、貨物普通・小型（車両総重量3.5t超）、貨物普通・小型（車両総重量3.5t以下）の平均使用年数は、それぞれ道路運送車両法分類の普通貨物、小型貨物のデータを用いて計算している。

表4　自動車の平均使用年数

車種		平均使用年数
乗合	普通・小型	15.5
乗用車	自家用普通・小型	13.3
	事業用普通・小型	5.0
貨物車	普通・小型（車両総重量3.5ｔ超）	16.2
	普通・小型（車両総重量3.5ｔ以下）	11.3
軽自動車		16.2

3.　平成4年以降の交通事故損失の経年変化の要因分析

ここでは、自動走行システムの便益を論じる上での基礎的な情報整理として、平成4年以降の交通事故損失の経年変化の要因分析を行い、技術の果たしてきた役割を確認する。要因分析は、4輪車間の車両相互を対象とし、次式を用いて実施した。

$$S = D \cdot A \cdot L \tag{1}$$

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta L}{L} + R \tag{2}$$

S：交通事故による損失総額（各年とも、表3の損失額に、各年の被害者数を乗じて計算）

D：総走行キロ

A：走行キロあたりの事故数

L：1事故あたりの損失額

R：要因分解不可能な部分

このモデルのよって、交通事故による損失総額の変化率は、「総走行キロの変化」と、「走行キロあたりの事故数の変化」、「１事故あたりの損失額の変化」という３つの変化の変化率の和として近似することができる。

図 1 は、分析結果を示したものである。まず、平成 4 年から 9 年にかけての 5 年間の交通事故による損失総額の変化率は、＋5.3%の変化であり、この＋5.3%の変化を、上記３つの要因に寄与度分解すると、「総走行キロの変化」の寄与度が+9.7%、「走行キロあたりの事故数の変化」の寄与度が+6.3%、「１事故あたりの損失額の変化」の寄与度が－9.7%となっている（要因分解不可能な部分の寄与度は－1.0%）。総走行キロや走行キロあたりの事故数の増加が全体の事故損失を増加させる方向に動いているが、１事故あたりの損失額の減少が、損失額増加の一部を相殺しているのである。ちなみに、「走行キロあたりの事故数の変化」を起こす要因としては、自動車の車種別構成比の変化、ドライバーの安全運転意識の向上、道路走行環境の改善、事故そのものを防止するアクティブ・セーフティ技術の高度化とその保有車両への浸透などが挙げられる。一方、「１事故あたりの損失額の変化」を起こす要因としては、上記と同様に自動車の車種別構成比の変化の他、パッシブ・セーフティ技術の高度化とその保有車両への浸透が挙げられる。平成 4 年以降平成 27 年までの 24 年間を 5 つに区分してみると、「走行キロあたりの事故数の変化」の寄与度は、平成 14 年までは事故損失を増加させる方向に作用しているが、平成 14 年以降は、事故損失を減少させる方向に作用している。一方、「１事故あたりの損失額の変化」は、平成 4 年以降、平成 27 年まで一貫して事故損失を減らす方向に作用しているが、徐々に効果が低下する傾向にあり、平成 24 年から 27 年の 3 年間に限っては、事故損失減少への寄与はほとんどみられなくなっている。

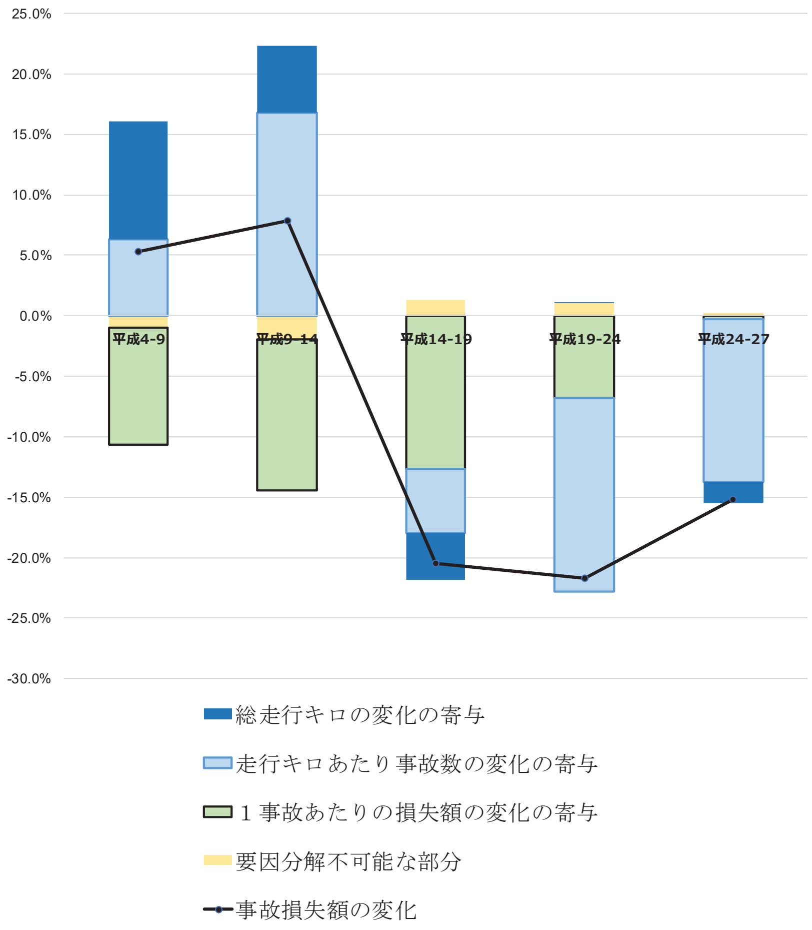

図１　交通事故損失の変化の要因分解（４輪－４輪　車両相互事故）

注）特殊車並びに特種用途車を除いて集計

次に、図２は、上述した「走行キロあたりの事故数の変化」の寄与度を、「車種別保有車両数の変化並びに車種別１台あたりの走行キロの変化」に起因する部分と「その他」に起因する部分に要因分解したものである。「車種別保有車両数の変化並びに車種別１台あたりの走行キロの変化」は、常に事故損失を増やす方向に作用しているが、「その他」（アクティブ・セーフティ技術の寄与が含まれる）は、平成 14 年-19 年の期間を除き、事故損失を減少させる方向に作用している。

一方、図３は、上述した「１事故あたりの損失額の変化」の寄与度を、「当事者車種相関別事故数変化」の寄与部分と、「その他」に起因する部分に要因分解したものである。両要因ともに、事故損失を向ける方向に作用しているが、「１事故あたりの損失額の変化」を引き起こしているのは、主に「その他」の要因であり、この間、衝突安全性の確保に拘わる基準が相次いで強化されてきたことを考えると、パッシブ・セーフティ技術の高度化とその保有車両への浸透が大きく寄与していると推察できる。

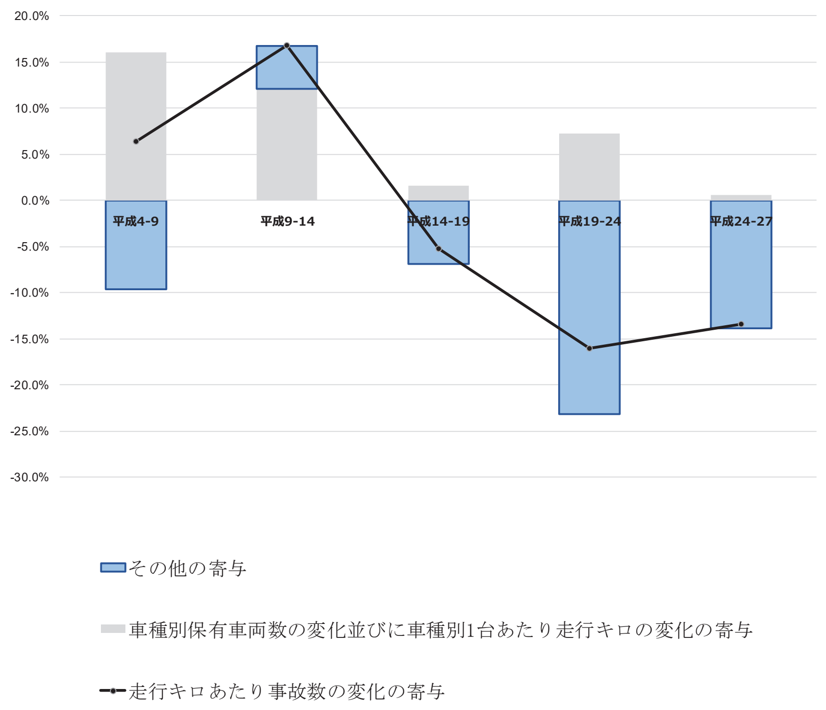

図２　走行キロあたり事故数の変化の要因分解（４輪－４輪　車両相互事故）

注）特殊車並びに特種用途車を除いて集計

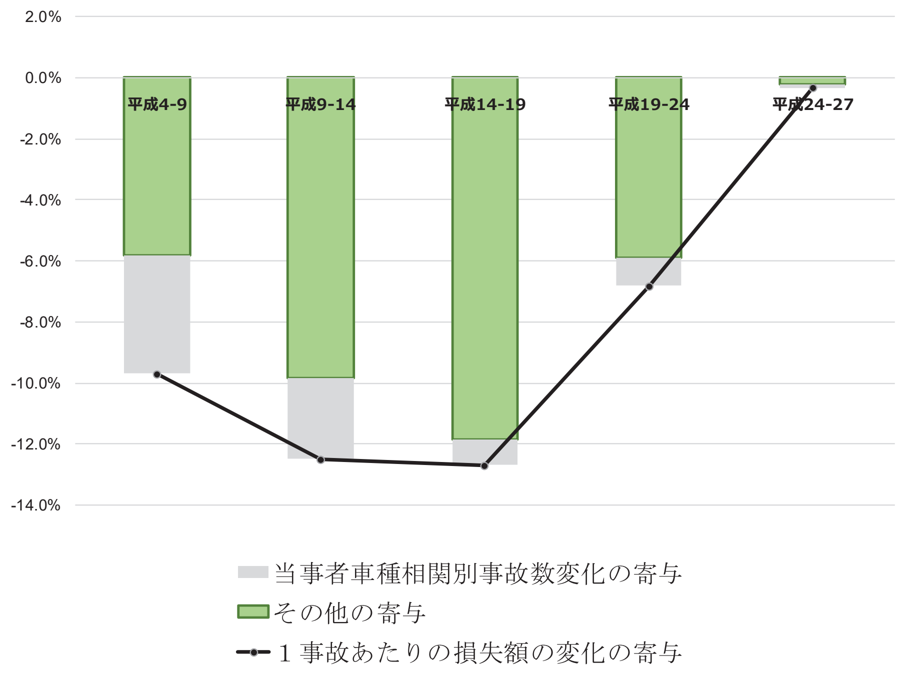

図３　１事故あたり損失額の変化の要因分解（４輪－４輪　車両相互事故）

注）特殊車並びに特種用途車を除いて集計

4.　自動走行システムの経済的性質

ここでは、自動走行システムの経済的性質を、「自律型」「車々協調型」「路車協調型」の 3 つに分けて論じる。本稿で想定している自動走行システムは、内閣府(2014)の分類でいうレベル 1 または 2 の自動走行であり、先進運転支援システム（ADAS : Advanced Driving Assistant System）とも呼ばれる技術である。また、以降、自動走行システムの便益という言葉が意味するのは、交通事故損失回避という便益である。

まず、私的便益と外部性の概念について説明する。私的便益とは自動走行システムのデバイスを装備した車のドライバーが、それによって享受できる便益を指す。一方、外部性とは、その車がデバイスを装備したことによって、他の車のドライバーが享受する便益のことを指す。ここでは、表 5 に整理した自動走行システムの経済的性質を、追突事故を例に説明する。

まず、現在市販されている自動ブレーキのような「自律型」のデバイスの場合は、私的便益は（多くの場合１当となる）後続車が（多くの場合２当となる）前方車への衝突に伴う事故損失を回避できることから生じる。一方、これによって、前方車は後続車からの衝突に伴う事故損失が回避できるようになる。これが前方車に生じる外部性便益であり、この外部性は、デバイスの装備有無にかかわらず、全ての車が享受することになる。追突事故の場合は、一般的に、後続車の乗員よりも前方車の乗員のほうの人身損傷程度が重く事故損失が大きくから、デバイスを購入する後続車が享受する便益よりも多くの便益を、他の車（デバイスを装備している場合も装備していない場合もある）が享受するという、少し奇妙な関係が成立する。

一方、同じ追突事故を、「車車協調型」によって防止するというのも技術的に可能である。この場合、衝突の可能性のある 2 台の車が共にデバイスを装備している場合にのみ事故が避けられ、デバイスを装備していない車は、事故損失回避の便益を享受することはできない（但し、多重衝突事故の場合を除く）。一方、装備車両が増加するにつれて、装備車両は、回避できる追突事故が増加する。いいかえれば、ある車がデバイスを装備することによる外部性は、既にデバイスを装備している車に生じるのである。

最後の「路車協調型」の場合であるが、これについては詳述を避けるが、路側インフラが設置された場所でのみ稼働するという以外、便益の帰属という点では、「自律型」と同じ性質を持っている。

表 5　自動走行システムの経済的性質

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">システム</th><th rowspan="2">私的便益
（支払意思額）</th><th colspan="2">外部性（他の車の享受する便益）</th></tr>
<tr><th>同一システムの自動走行車</th><th>手動走行車またはシステムの異なる自動走行車</th></tr>
<tr><td colspan="2">自律型</td><td>1当事故回避</td><td colspan="2">２当事故回避</td></tr>
<tr><td rowspan="2">協調型</td><td>車車協調（またはクラウド協調）</td><td>他の自動走行車との１・２当等事故回避</td><td>回避できる１・2当事故の増加</td><td>ナシ</td></tr>
<tr><td>路車協調</td><td>１当事故回避</td><td colspan="2">2当事故回避</td></tr>
</table>

こうした外部性を伴う財・サービスでは、それを社会に最適に普及させるためには、何らかの経済的なインセンティブや政府の規制が必要になる。以下では、車載デバイス装備義務化の効果について論じる。

5.　車載デバイス装備義務化の効果

ここでは、4.で紹介した自動走行システムの経済的性質を踏まえ、追突事故防止技術を例にして、装備義務化の効果を分析する。目下、日本では、衝突被害軽減ブレーキについては、車両総重量3.5t超の新車トラック、乗車定員10人以上の新車バスへの装備義務化が導入されている。

分析に当たっては、「自律型」と「車車協調型」の2つの追突事故防止装置を考える。便益は、2015年度の事故損失額に自動車の平均使用年数を乗じて計算する。また、議論を単純化するために、両技術共に、追突事故を100%防止することができると仮定する。

図4は、「自律型」のデバイスを、車種毎に全車両同時に装着させた場合の装備義務対象車両1台あたりの効果を、装備義務化対象車両が享受する便益（事故当事者と同乗者双方の事故損失回避）と、非義務化車種が享受する便益に分けて示したものである。なお、この便益は、表3の人身損傷程度別の損失額を用いて計算したものであり、便益には事故当事者が直接享受しない便益（事業主体の損失回避、公的機関の損失回避等）も含まれている。また、装備義務化対象車種の享受する便益には、同一車種の車両を後続車とする追突が回避できるという外部性便益が含まれている。これをみると、いずれの車種を義務化したとしても、義務化対象車種の享受する便益よりも、それ以外の車種が享受する便益のほうが大きい。これは、追突事故では、前方車の損失が後続車のそれよりも大きいという現象が反映されたものである。車種別に効果を比較すると、最も効果が大きいのは、事業用普通・小型乗用車（タクシー）であり、普通・小型貨物車（車両総重量3.5t超）がそれに続く。現在、装備が義務化されている乗合（普通・小型）（バス）については、この分析の範囲では、相対的に効果が大きいとはいえない。分析対象年を増やすなどして、さらなる検証が必要である。

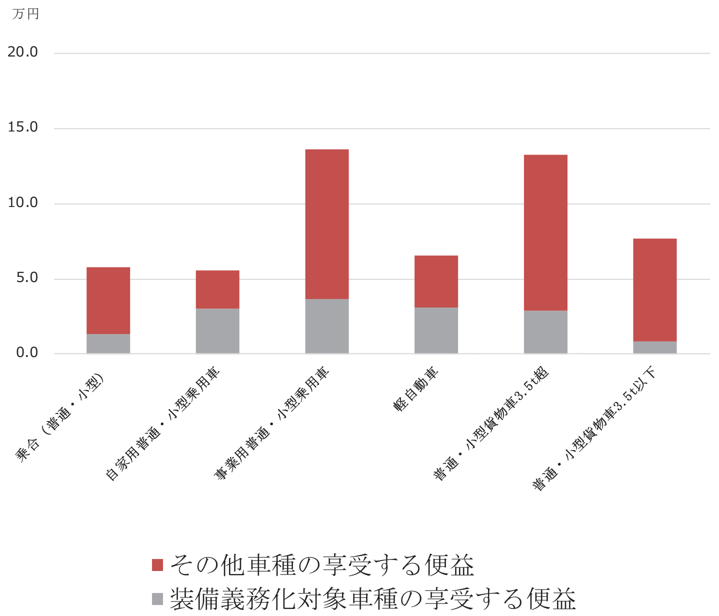

図４　装備義務化車両１台あたりの効果（自律型）

注１）2015 年データを利用して計算

注２）便益には事故当事者が直接享受しない便益（事業主体の損失回避、公的機関の損失回避）も含む。

注３）装備義務化対象車種の享受する便益には、同一車種の車両からの後方からの追突が回避できるという便益を含む。

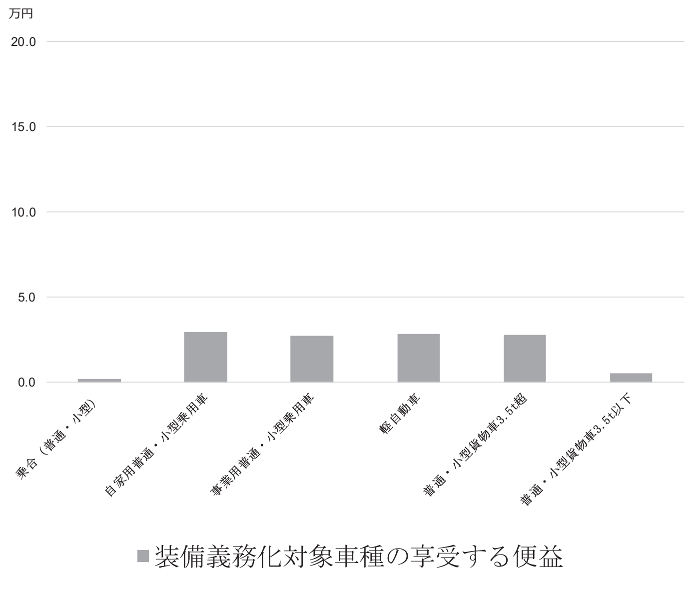

図５　装備義務化車両１台あたりの効果（車車協調型）

注１）2015 年データを利用して計算

注２）便益には事故当事者が直接享受しない便益（事業主体の損失回避、公的機関の損失回避）も含む。

注３）装備義務化対象車種の享受する便益には、同一車種の車両からの後方からの追突が回避できるという便益を含む。

次に、図 5 は、「車車協調型」デバイスを装備義務化した場合の便益の計算結果である。この場合は、装備義務化対象車両同士でしか事故が防げないから、「自律型」の場合に比べて効果は小さくなる。ただし、「車車協調型」デバイスの装備義務化は、装備義務化対象車種以外の車種のデバイスに対する需要を高める効果がある。このような効果は「自律型」には生じない。

ところで、「車車協調型」デバイスの需要曲線は、独特の形状を示す。図 6 は、「車車協調型」デバイスのような「ネットワーク外部性」が作用する財・サービスの需要曲線の形状を、通常の右下がりの需要曲線と対比させて描いたものである。ここでいう「ネットワーク外部性」とは、個人がある財・サービスから得る便益が、その財・サービスを消費する個人の人数が増加すればするほど増加するという需要側の規模の経済性を意味し、Libenstein （1950）、Rohlfs（1974）、Katz and Shapiro （1985,1994）が、それぞれ「バンドワゴン効果(bandwagon Effect)」、「通信需要の相互依存性(Independent Demand for a Communications Service)」、「直接的ネットワーク外部性 (Direct Externalities)」と呼んだものである。図6の需要曲線は、ネットワーク外部性が作用する財・サービスの期待均衡需要曲線と呼ばれるもので、逆 U 字型の形状となる。需要曲線は、当該財・サービスに対する支払い意思額の高い者から順に、支払い意思額を降順に並べたものであるから、定義上、通常の財・サービスでは右下がりとなり、逆向 U 字型になることはない。しかし、ネットワーク外部性が作用する場合には、普及率の低い段階（すなわち、支払い意思額の高い者しか購入していない段階）での支払い意思額が低くなる。低普及率のために通信できる相手車両が少ないため、支払い意思額の相対的に高いドライバーといえども支払い意思額が低くなるからである。いま、仮にデバイスの価格が緑の水平線の水準にあると仮定すると、期待均衡需要曲線は、価格線と２つの点で交差する。この内、普及率が低い方の普及率がクリティカル・マスと呼ばれる普及率であり、実際の普及率がこの点を越えれば、市場普及率はもう一つの交点の普及率まで自動的に増加していくが、この水準を越えることができなければ、普及率は最終的にはゼロへと戻っていく。

さて、「車車協調型」デバイスの装備義務化は、義務化対象車種以外の車種のデバイスに対する需要曲線をどのように変化させるのだろうか？　図 7 は乗合（普通・小型）（バス）、営業用普通・小型乗用車（タクシー）、普通・小型貨物車（車両重量 3.5 トン超え）の 3 車種についてデバイスの装備を義務化した場合のそれぞれについて、乗用車（自家用普通・小型乗用車と軽乗用車）の「車車協調型」デバイスに対する需要曲線を描いたものである。この需要曲線を描くにあたっては、上述の人身損傷程度別損失額の内、非金銭的損失部分のみを用いて支払意思額を計算している。

これによれば、需要曲線の逆 U 字という性質を変えることができる、言い換えれば、クリティカル・マスを越えなければ普及しないという問題の解決に資するのは、普通・小型貨物車（車両重量 3.5 トン超え）にデバイスの装備を義務化した場合だけである。これは、普通・小型貨物車（車両重量 3.5 トン超え）と衝突した場合の乗用車の損失が大きいという点にも起因するが、主には、普通・小型貨物車（車両重量 3.5 トン超え）の車両数が、乗合（普通・小型）（バス）、営業用普通・小型乗用車（タクシー）それぞれの 10 倍を超えるという事実に起因している。

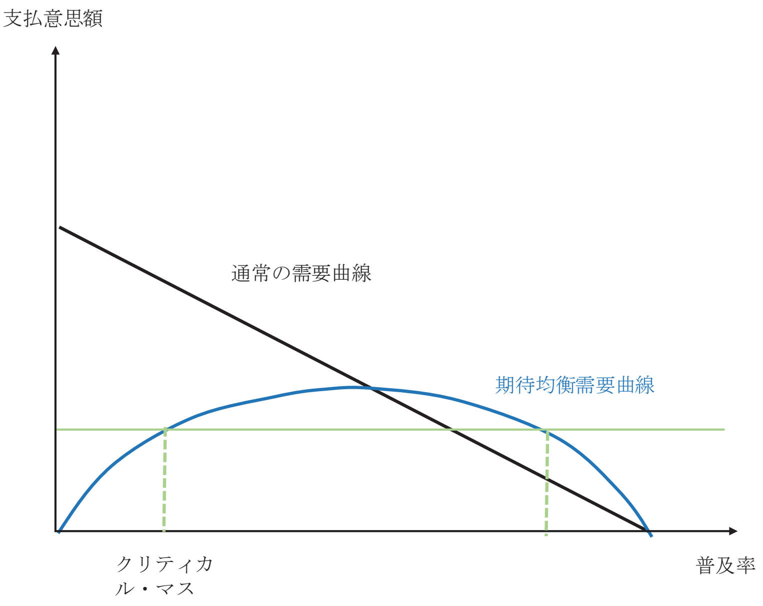

図６　期待均衡需要曲線

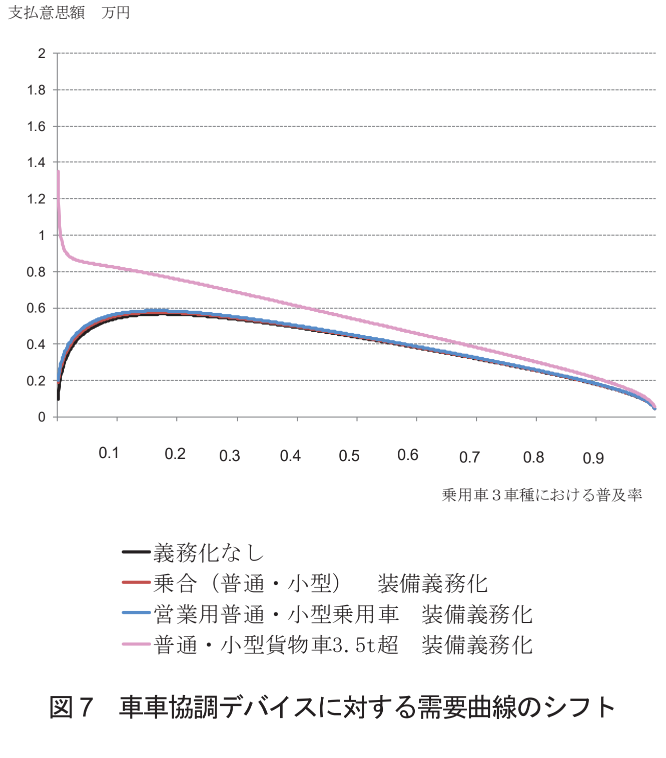

図７　車車協調デバイスに対する需要曲線のシフト

注１）2015年データを利用して計算
注２）乗用車とは自家用普通・小型乗用車と軽乗用車を指す
注３）走行距離以外は同質で且つ完全情報下で合理的な消費者を仮定
注４）走行距離が長い程事故遭遇確率が高く、デバイスに対する支払意思額が高いと仮定
注５）上述の人身損傷程度別損失額の内、非金銭的損失部分のみを用いて支払意思額を計算

6. 政策的なインプリケーションなど

以上、本稿は、まず、平成 4 年以降の交通事故損失の経年変化における技術の役割を概観した後、自動走行システムの経済的な性質を整理し、それに準拠して、「自律型」と「車車協調型」の追突事故防止技術を対象に、デバイスの装備を義務化するという政策の効果を検討した。本稿の分析結果から得られた政策的なインプリケーションは、以下の 3 点である。

- 自動走行システムはシステム形態によって経済的性質が大きく異なり、普及のためにはそれを踏まえた政策が必要である。
- 追突事故防止を対象にした分析では、「自律型」では、事業用普通・小型乗用車（タクシー）へのデバイスの装備義務化も相対的に効果が大きい。
- 「車車協調型」の追突防止デバイスを考えた場合、貨物重量車への装備義務化は、乗用車のデバイスへの需要曲線を上方シフトさせ、クリティカル・マス問題の解決に資する。

今後、この研究は、分析対象とする年を拡大し、本稿の分析の頑健性を検証する作業や、車線逸脱防止技術等、他の技術へ分析対象を拡大していく作業を実施していく予定である。また、デバイスの装備義務化の是非については、本稿の分析だけで結論できるものではなく、コストと便益の対比、技術のもたらす便益に関する消費者の有する情報のレベルなど、別の観点からの検討が必要である。

注

「5. 車載デバイス装備義務化の効果」で利用した分析手法の詳細についてご関心ある方は、三好(2016)を参照下さい。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 25281071 の助成を受けている。また、本研究で利用した自動車保有車両数情報の一部は、一般財団法人自動車検査登録情報協会から提供を受けたものである。

参考文献

内閣府（2012)、 内閣府政策統括官『平成 23 年 交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査 報告書』

内閣府（2016)、 内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当)『戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）自動走行 システム研究開発計画』

佐野雅之（2016)、「自動車の残存率の簡便推計」同志社大学技術・企業・国際競争力研究センターワーキングペーパー、08-06.

三好博昭（2016)、「自動運転システムの普及政策：追突事故防止技術」同志社大学技術・企業・国際競争力研究センターワーキングペーパー、16-02.

Katz, M.L., and C. Shapiro (1985) : ‘Network Externalities, Competition, and Compatibility’, *American Economic Review*, 75, 424-40.

Katz, M.L., and C. Shapiro (1994): ‘Systems Competition and Network Effects’, *Journal of Economic Perspectives*, 8, 93-115.

Libenstein, H. (1950): ‘Bandwagon, Snob and Veblen Effects in the Theory of Consumer’s Demand’, *Quarterly Journal of Economics*, 64, 183-207.

Rohlfs, J.H.(1974): ‘A Theory of Independent Demand for a Communications Service’, *Bell Journal of Economics and Management Scien*ce, 5, 16-37.