



自動運転システムの普及政策：追突事故防止技術

三好 博昭

Diffusion Policies of Automated Driving Systems: Rear-end Collision-Prevention Systems

Hiroaki Miyoshi

ITEC Working Paper Series

16-02

July 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

三好 博昭

同志社大学 総合政策科学研究科教授
公益財団法人 交通事故総合分析センター（ITARDA）客員研究員

602-8580 京都市上京区今出川通烏丸東入
Tel: 075-251-3837/ Fax: 075-251-3837
E-mail: hmiyoshi@mail.doshisha.ac.jp

キーワード：自動運転システム、追突事故、車車協調型、自律型、ネットワーク外部性、
クリティカル・マス

JEL codes: C51, C63, D62, R41

著者の専門領域：

公共経済学、交通経済学

要旨：

Google 社のドライバーレスカーの公道実験が開始されて以降、自動運転システムに世界の注目が集まっている。本稿は、追突防止技術を分析対象として、その経済的性質に配慮して私的便益と外部性便益の定式化と計測を行う。また、これに基づき、装置の装着義務化という規制政策が、私的限界便益曲線の形状にどういった影響を与えるのかを分析するものである。本稿の分析で得られた主な知見は、次の通りである。1) 自立型、車車協調型共に、最適普及水準を達成するためには価格の半分以上を補助する必要がある、2) 装着義務化は私的便益曲線を押し上げクリティカル・マスを小さく、あるいは消滅させる効果がある。

謝辞：

本稿は、JSPS 科研費 25281071（次世代自動車の普及政策とそのグローバル・ベネフィットに関する研究）の助成を受けたものである。また、公益財団法人 交通事故総合分析センター（ITARDA）の客員研究員プログラムのサポートを受けている。ただし、本稿の内容は、すべて著者の個人的見解であり、ITARDAの見解を示すものではない。

自動運転システムの普及政策：追突事故防止技術

三好博昭

1.はじめに

Google 社のドライバーレスカーの公道実験が開始されて以降、自動運転システムに世界の注目が集まっている。日本においても、内閣府（2014）が、「2017 年までに信号情報や渋滞情報等のインフラ情報を活用した準自動走行システム（レベル 2）を市場化する。さらに、2020 年代前半を目途に準自動走行システム（レベル 3）を市場化し、2020 年代後半以降には完全自動走行システム（レベル 4）の市場化を目指す」と謳っている。高齢者など交通弱者への移手段の提供、悲惨な交通事故撲滅の切り札との観点から、自動運転に対する社会的関心も非常に高い。

この自動運転システムについて、技術に関する研究は膨大な数にのぼるが、その便益や普及政策等に関する経済学な研究はまだ始まったばかりである。Anderson et al. (2014) は、自動運転システムの費用と便益を、安全・渋滞・燃料消費・土地利用等の観点から包括的に議論している。U.S. DOT (2015)は、自動運転のインパクトを安全、モビリティ、エネルギー・環境、交通システム、アクセシビリティ、経済的便益、土地利用の 7つの分野に分類し、それぞれの計測方法を議論している。自動運転の効果を実施に計測した分析としては、たとえば Anderson et al. (2012) がある。この研究では、本稿の分析対象と同じ追突防止装置を研究対象とし、この技術は追突事故の削減に大きく寄与するけれども、大型車を除いて費用便益比率は 1 を下回るという結果を示している。日本では、横田・上田 (1997) が AHS (Advanced Cruise-Assist Highway System) を対象に、AHS のサービスレベルとサービス対象道路種別毎に、費用と便益を分析している。

今後、U.S. DOT (2015)の分析フレームワーク等に準拠して、経済的観点からも様々な研究が実施されると考えられるが、目下のところ、U.S. DOT (2015)を含む上述した先行研究では、装置の市場普及率が外生的に取り扱われている点が問題である。こうした方法では技術の市場普及のためにはいかなる政策が効果的なのかといった疑問には応えることができない。自動運転システムのシステム方式は、大きく「自律型」と「協調型」に分類され、さらに協調型は、「車車協調」、「クラウド協調」、「路車協調」、「歩車協調」に細分される。これらは外部性という点で、それぞれ独自の性質を持っている。こうした経済的性質を考慮した普及政策評価モデルを開発し、各種政策の効果を比較検討していく研究が、今後が重要となろう。

本稿は、このような問題意識の下、追突事故を分析対象として、追突防止技術の経済的性質に配慮して私的便益と外部性便益の定式化と計測を行う。また、これに基づき、装置の装着義務化という規制政策が、私的限界便益曲線（すなわち需要曲線）の形状にどういった影響を与えるのかを分析するものである。

以下、2.では、分析対象とする事故と技術、計測対象とする便益について述べる。次に3.では、私的便益と外部性便益の算出方法と利用データについて述べる。4.では、公益財団法人交通事故総合分析センター（ITARDA）『交通事故集計ツール』による事故数や死傷者数の集計結果を用いて、日本における追突事故の発生状況と特色を解説する。そして5.で、追突防止の私的限界便益と社会的便益、並びに装置の装着義務化の及ぼす影響について論じる。

2. 分析対象

本稿で分析対象とする事故・技術、計測対象とする便益は以下の通りである。

2.1. 分析対象とする事故と技術

上述したように、本稿で分析とする事故は、追突事故である。追突事故を防止する開発済みまたは開発中の技術には、衝突被害軽減ブレーキ、ACC (Adaptive Cruise Control)、CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control)の3つがある。衝突被害軽減ブレーキは、カメラやレーダーなどを用いて前方車や前方障害物を検知し、追突の危険性がある場合にドライバーに警告したり、自動的にブレーキを作動させることによって、被害を軽減する装置である。ACCは、高速道路上などでミリ波やカメラなどのセンサーを利用して前方車両との距離を計測し、アクセル操作とブレーキ操作を自動で行うシステムである。ACCと衝突被害軽減ブレーキとの違いは、ACCが制動に加え加速を自動的に行う点、車間距離維持という機能を有する点にある。次にCACCでは、複数の車が車車間通信で繋がれ加減速の情報等を共有する。これによって、前方車両がブレーキ操作を行えば、ほぼ同時に後続車である自車のブレーキ操作が自動的に行われる。CACCではACCよりもきめの細かい車間距離維持が実現できる。また、複数の車の隊列走行もこのCACCで実現可能となる。内閣府(2014)の分類に従えば、衝突被害軽減ブレーキはレベル1(加速・操舵・制動のいずれかを自動車が行う状態)、ACCとCACCはレベル2(加速・操舵・制動のうち複数の操作を同時に自動車が行う状態)のレベルに分類される。システム方式という点では、ACCと衝突被害軽減ブレーキは、車に搭載したカメラ・センサーなどの機器だけで走路環境を認識して走行する自律型であり、CACCは、無線通信を利用して得た情報を利用して走路環境を認識する協調型、さらにいえば、車と車との通信を利用する車車協調型の技術である。

ところで、こうした技術が追突事故をどの程度防げるかについては様々な研究が行われている。Fitch et.al (2008)は、FCW (forward collision warning alarms)を重量車に搭載することで、追突事故は21%削減できるとしている。Anderson et al. (2012)は、死亡事故の20-40%、傷害事故の30-50%がFCAT (forward collision avoidance technology) システムで防ぐことができるとしている。また、Jeong and Oh (2015)は、シミュレータ(microscopic traffic simulator)を使った分析で、ACCを含むAVSS (active vehicle safety system)が、ある

条件下で追突事故を 78.8%減少させるとしている。

このように、技術がどの程度の割合の事故を防げるかについては様々な先行研究があるが、本稿の分析では、いずれの技術を用いても追突事故が 100%回避し得ると仮定して、事故回避から得られるユーザの私的便益を分析する。すなわち、本稿で留意する追突防止装置の技術的側面は、自律型か車車協調型かという点のみであって、各技術の事故回避のパフォーマンスという点については、本稿の議論から捨象する。こうした分析手法を採用するのは、1) 各技術の事故回避のパフォーマンスに関しては様々な計測結果があり一意に数値を設定しにくい、2) 各技術の事故回避のパフォーマンスを考慮の外に置くことによって、ユーザの私的便益が、自律型か車車協調型によってどのように異なるのかを、よりクリアに浮き彫りにすることができる、という 2 つの理由に基づく。一方で、この仮定を置いたため、本研究の分析結果は、現実の技術の便益を評価するものとはならない。

2.2. 計測対象とする便益

分析対象とする便益は、既に触れたように、交通事故損失の回避という便益である。上述した ACC や CACC は、追突事故を防ぐに止まらず、ユーザの通常の運転のサポートを行い、ドライバーの身体的疲労を軽減するという効果がある。しかしながら、こうした便益は本稿では計測の対象とはしない。技術の性能に関して非現実的な仮定を置くのと同様に、この便益の限定も、本研究の便益の計測結果と現実の技術の便益とが乖離する、もう 1 つの大きな要因である。

さて、内閣府(2012)によれば、交通事故による損失は、金銭的損失と非金銭的損失に別けられる。金銭的損失とは、人的損失（治療関係費、休業損失など）、物的損失（車両、構築物の修理など）、事業主体の損失（死亡、後遺障害、休業などによる付加価値低下分の損失）、各種公的機関の損失（救急搬送費、警察の事故処理費用等）等で構成される。一方、非金銭的損失とは、「道路交通事故の発生により、個人等の身体や財物が物理的な損傷を被ることによって発生する被害者の肉体的・精神的な悲しみ、被害者の家族および友人の精神的苦痛や悲しみ、さらには加害者並びにその家族及び友人の心理的負担など、金銭的資源の消費、滅失及び性能低下以外の損失のこと」を指しており、内閣府(2012)では、この内、被害者本人が交通事故に遭うことで被る痛み、苦しみを対象にして、損失額を死亡損失と負傷損失に区分して推計している。

本研究で、金銭的損失と非金銭的損失の内、非金銭的損失を事故防止装置購入のよってもたらされる便益と考える。なぜならば、金銭的損失の多くは損害保険でカバーされており、ユーザが追突防止装置を購入するのは、非金銭的損失の回避を目的としていると考えるからである。

3. 便益の算出方法

以上のような分析の枠組みで、次のような算出方法とデータを用いて便益を算出する。

3.1. 計算方法

走行距離の長いユーザほど事故に遭遇する確率が高くなり、装置の装着によってより大きな便益を得るとする仮定の下、次のような方法で私的便益の計算を行う。

まず、自律型であるが、この方式の経済的な特色は、前方車の装置の装着有無には関係なく、自身が後続車となる追突事故を回避できる点にある。よって、車種 k を利用する個人 i が自律型を利用することによって享受する私的便益 $U_{i,k}^a$ は、

$$U_{i,k}^a = \sum_{t=0}^{t_k} \frac{1}{(1+r)^t} (d_{i,k} * \sum_{l=1}^m (\sum_{j=1}^{n_l} d_{j,l} * a_{k,l} * v_{k,l})). \quad (1)$$

で定義できる。ここで、 $d_{i,k}$ は車種 k を利用する個人 i の年間走行距離であり、確率分布を想定する。 n_l は車種 l の自動車台数（ユーザの数）を示す。 $a_{k,l}$ は車種 k を後続車、車種 l を前方車とする追突事故の年間事故数を、後続車、前方車双方の年間走行台キロを乗じた数値で除した求めた値である。 $v_{k,l}$ は、車種 k を後続車、車種 l を前方車とする追突事故 1 事故あたりの後続車の非金銭的損失額を示す。 m は車種の数であり、本研究では車種を、普通・小型貨物車、軽貨物車、普通・小型乗合車、事業用普通・小型乗用車、自家用普通・小型乗用車、軽乗用車の 6 つに分類している。 t_k は車種 k の使用年数、 r は割引率（本稿では 0.04 を用いる）である。なお、装置が普及すれば、装置の装着車には、装置を装着する後続車からの衝突が回避できるという便益が生じる。しかしこの便益はこの式には含まれていない。なぜなら、その便益は装備の装着車か否かに関わらずすべての車が享受できる便益であり、装置を購入する際の私的便益とはならないからである。車種 k を利用する個人 i が自律型を装備することによって他の自動車が享受するこの外部性便益の大きさは次のように表すことができる。

$$E_{i,k}^a = \sum_{t=0}^{t_k} \frac{1}{(1+r)^t} (d_{i,k} * \sum_{l=1}^m (\sum_{j=1}^{n_l} d_{j,l} * a_{k,l} * w_{k,l})). \quad (2)$$

ここで、 $w_{k,l}$ は車種 k を後続車、車種 l を前方車とする追突事故 1 事故あたりの、前方車の非金銭的損失額を示す。

次に車車協調型の場合であるが、このシステムの経済的な特色は、前方車と後続車が共に装置を装着した場合にのみ追突事故を防ぐことができる点にある。後続車の立場で

考えた場合、自車が装置を装着し且つ前方車が装着車であった場合にだけ前方車との衝突を回避できる。前方車の立場で考えた場合、自車が装置を装着し後続車が装着車であった場合にだけ後続車との衝突を回避できる。このことから、車種 k を利用数する個人 i が車車協調型を利用することによって享受する私的便益 $U_{i,k}^c$ は、

$$U_{i,k}^c = \sum_{t=0}^{t_k} \frac{1}{(1+r)^t} (d_{i,k} * (\sum_{l=1}^m (\sum_{j=1}^{q_l} d_{j,l} * a_{k,l} * v_{k,l} + \sum_{j=1}^{q_l} d_{j,l} * a_{l,k} * w_{l,k}))). \quad (3)$$

と定義できる。ここで q_l は車種 l で装置を装着した自動車の中で最も走行距離が短い限
界ユーザの走行距離の順位である。よって $\sum_{j=1}^{q_l} d_{j,l}$ は、車種 l で装置を装着した車の年間
走行台キロを示す。

今回の推計で私的便益を算出したのは乗用車の 2 車種（自家用普通・小型、軽）のみ
であり、それ以外の 4 車種については計算していない。これは、これら車両は企業の所
有物が多く、非金銭的損失をもって私的便益とする考え方を適用できないとの判断から
である。ただし、車車協調型でこれら車種に装置の装着義務を課した場合に、これら車
種に乗車する人員の非金銭的損失額がどの程度の大きさになるかは推計している。

なお、上述した 3 つの式は自動車の使用年数を整数として定式化しているが、実際
の計算では 1 年未満の端数の期間に生じる便益も含めて計算している。

3.2. 利用データ

次に上記の計算式で用いた各種変数のデータについて解説する。データは概ね 2012
年の数値を用いている。

3.2.1. 自動車台数と年間走行距離

まず、2012 年の車種別の自動車保有台数は、一般財団法人自動車検査情報登録協会
の Web site から得られる 2011 年度末と 2012 年度末の車種別自動車保有台数の平均を
とって 2012 年央の保有台数を求めた。

次に、乗用車の走行距離は対数正規分布にしたがって分布すると仮定し、日本自動車
工業会(2013)で得られる 2012 年の月間走行距離の距離帯別分布から月間走行距離の平
均値と中央値を求め、その平均値と中央値から年間走行距離の対数正規分布のパラメー
タを算出した。なお、この方法で求められる年間走行距離の平均値は、国土交通省『自
動車輸送統計月報』で得られる車種別総走行距離と上述した自動車保有台数から算出で
きる年間走行距離の平均値と異なる。このため、これに合致するように、対数正規分布
のパラメータを補正している。

乗用車の私的便益の算出にあたって必要となる他の車種の年間走行距離は、同一車種

のすべての車の走行距離は等しいとし仮定し、国土交通省『自動車輸送統計月報』と自動車保有台数から算出できる車種別の年間走行距離の平均値を用いた。

3.2.2. 交通事故数と死傷者数

交通事故数や死傷者数については、ITARDA『交通事故集計ツール』を用いて 2012 年の事故を対象に集計した。このデータに含まれる事故は、人の死亡または負傷を伴う事故に限定されており、事故に関与した人が誰も死傷しない物損事故は含まれていない。

3.2.3. 非金銭的損失の原単位

人身損傷程度別の非金銭的損失額は、表 1 の通りとした。この内、死亡の損失額は内閣府 (2012) で設定された 2009 年の数値を、GDP デフレーターを用いて 2012 年値に調整したものである。負傷損失については、内閣府(2012)では「入院中 (傷害度)」の状態と「退院後 (後遺症)」の状態から負傷を 8 つ (Q, W, E, R, Y, I, O, A) に区分し、負傷区分ごとに 2009 年の損失額を推計している。一方、ITARDA『交通事故集計ツール』で得られるデータの人身損傷程度は、死亡、重傷、軽傷の別であり、負傷の区分は内閣府(2012)とは異なる。ここでは、ITARDA『交通事故集計ツール』で得られるデータの「軽傷」は内閣府(2012)の負傷区分 A に相当すると考え、内閣府(2012)のその他の 7 つの負傷区分は ITARDA『交通事故集計ツール』の区分の「重傷」に相当すると仮定し、重傷、軽傷別の非金銭的損失額を設定したⁱⁱ。重傷の損失額は、損害保険料率算出機構(2013)のデータを用いて、2012 年の 7 つの負傷区分の構成比率を考慮して算出した。表 1 の数値は、それらの結果を GDP デフレーターを用いて 2012 年値に調整したものである。

ただし、以下のシミュレーションでは、この非金銭的損失額そのものは用いず、死亡の非金銭的損失を 10,000 とした指数を用いて損失の大きさを表す。表 1 の原単位は、被害者本人が交通事故に遭うことで被る痛み、苦しみの金銭換算値であって、被害者の家族および友人の精神的苦痛や悲しみ、さらには加害者並びにその家族及び友人の心理的負担などは含まない。これを考慮した場合、金銭額そのものの表示は適切ではないと考えたからである。

表 1 人身損傷程度別の非金銭的損失額

人身損傷程度	非金銭的損失 (万円)	指数
死亡	20,754	10,000
重傷	732	353
軽傷	23	11

出所) 内閣府 (2012) に基づき筆者作成

3.2.4. 自動車の平均使用年数

追突防止装置は新車購入時に装備され、それを利用することによる便益は、自動車の使用期間中継続する。それ故、便益を算出する際には、当該自動車が何年利用されるかが1つの重要な要素となる。そこで、次のような手法によって、車種別の平均使用年数を求めた。

まず、自動車の初度登録からの最大使用期間は40.5年であるとし、また、自動車の初度登録からの経過年別の廃棄率は、自動車の初度登録からの経過年を変数とするワイブル分布にしたがうと仮定する。この仮定によって、 t 年末の自動運転車の保有台数は過去41年間の販売台数の関数として次のように表すことができる。

$$STOCK_t = SALES_t * \exp\left(-\left(\frac{0.5+0}{\eta}\right)^m\right) + SALES_{t-1} * \exp\left(-\left(\frac{0.5+1}{\eta}\right)^m\right) + \dots + SALES_{t-39} * \exp\left(-\left(\frac{0.5+39}{\eta}\right)^m\right) + SALES_{t-40} * \exp\left(-\left(\frac{0.5+40}{\eta}\right)^m\right)$$

ここで $STOCK_t$ は t 年末の自動車の保有台数、 $SALES_t$ は t 年の自動車の新車登録台数である。また、 η はワイブル分布の尺度パラメータ、 m は形状パラメータである。ここでは、 $m=3$ を仮定したうえで、2012年の車種別自動車保有台数と1972年から2012年の車種別新車登録台数を用いて、2012年の自動車保有台数の推計誤差を極小化するように車種別に η を求めた。さらに、得られた η の値から、自動車の平均使用年数を求めた。推計に利用した保有台数と新車登録台数のデータは、一般社団法人日本自動車工業会『世界自動車統計年報』から得た。推計結果は表2の通りである。

表2 ワイブル分布のパラメータと平均使用年数の推定値

用途	車種	ワイブル分布		推計誤差	平均使用年数
		形状パラメータ	尺度パラメータ		
乗合	普通・小型	3.0	16.1	0.0	14.4
乗用車	事業用普通・小型	3.0	14.8	0.0	13.2
	自家用普通・小型	3.0	14.8	0.0	13.2
	軽	3.0	17.3	0.0	15.5
貨物	普通・小型	3.0	14.0	0.0	12.5
	軽	3.0	17.8	0.0	15.9

注) 推計誤差とは、保有台数の推計値と実施の値の差の絶対値を保有台数で除したものである。

4. 追突事故の発生状況と特色

私的便益の推計結果の前に、ここでは、日本の交通事故数や交通事故死傷者数に関する ITARDA 『交通事故集計ツール』による集計結果を紹介する。

4.1. 事故被害の特色

表 3 は、4 輪車間の車両事故について、事故類型毎の非金銭的損失示したものである。これによれば、追突は、6 つの事故類型の中で最も被害が大きく全体の約 3 分の 1 の 5,040,468 となっている。また、追突事故では、第 1 当事者（以下、1 当。交通事故当事者の内、過失の重い方。過失が同程度の場合には人身損傷程度の軽い方）に比べ第 2 当事者（以下 2 当。交通事故当事者の内、原則として過失の軽い方。過失が同程度の場合には人身損傷程度の重い方）或いは 2 当車の同乗者の被害額が、他の事故類型に比べて相対的に大きいのが特色である。追突事故では 1 当の大部分は後続車、2 当の大部分は前方車であり、この特色は、追突では前方車の人身障害程度が後続車のそれよりも大きいことを示している。

表 3 4 輪車の車両相互事故の事故類型別非金銭的損失（2012 年）

事故類型	1 当	1 当車の同乗者	2 当	2 当車の同乗者	合計
正面衝突	2,636,875	795,828	959,323	367,074	4,759,101
追突	706,254	223,264	2,998,420	1,112,530	5,040,468
出会い頭	1,095,308	548,401	1,529,191	592,262	3,765,162
右折	317,254	241,227	515,629	162,225	1,236,335
左折	16,897	13,176	33,001	10,706	73,781
その他	0	106,346	605,147	0	711,492
合計	4,772,588	1,928,243	6,640,711	2,244,797	15,586,340

注) $10,000 \times \text{死亡者数} + 353 \times \text{重傷者数} + 11 \times \text{軽傷者数}$ として算出。死亡者数、重要者数、軽傷者数は ITARDA 『交通事故集計ツール』を用いて集計

4.2. 事故数

表 4 は、2012 年の追突事故数を後続車の車種と前方車の車種のマトリックスで集計したものである。ITARDA 『交通事故集計ツール』では、後続車や前方車といった分類で事故数や死傷者数の集計はできない。そこで、2 当の衝突部位が前面のケースは、後続車が 2 当となった事故と見なしⁱⁱⁱ、このケースの集計数値を用いて、ITARDA 『交通事故集計ツール』で得た 1 当車種と 2 当車種のマトリックスでの集計数値を補正し、表 4 を作成している。

これによると、2012 年には、分析対象車種間で 218,548 件の追突事故が発生してお

り、その内の約半数の 108,908 件が自家用普通・小型乗用車が後続車として発生した事故である。また、これに事業用普通・小型乗用車と軽乗用車が後続車となった事故を合わせると、8 割弱の追突事故は、乗用車が後続車となって発生した事故であることが分かる。

表 4 追突事故の車種間別事故数 (2012 年)

前方車 \ 後続車	乗合 普通・小型	乗用車			貨物車		合計	
		自家用普通・ 小型	事業用普通・ 小型	軽乗用車	普通・小型	軽		
乗合	普通・小型	10	182	12	103	61	21	389
乗用車	自家用普通・小型	238	57,439	1,629	29,940	13,731	7,985	110,962
	事業用普通・小型	24	2,741	833	1,020	635	366	5,619
	軽	94	32,197	654	21,205	6,737	5,307	66,194
貨物車	普通・小型	66	7,644	274	3,482	4,579	1,366	17,411
	軽	39	8,705	196	4,820	2,563	1,650	17,973
合計		471	108,908	3,598	60,570	28,306	16,695	218,548

しかし、当然のことながら、この結果は、それぞれの車種の自動車の台数や走行距離に大きな影響を受けている。そこで、表 4 の事故数を後続車の年間走行台キロ (10 億 km) と前方車の年間走行台キロ (10 億 km) の積で除して基準化し(1)(2)(3)式の $a_{k,l}$ として利用している。

4.3.1 事故あたりの人身障害程度

表 5 は、追突事故 1 回あたり後続車の乗員 (すなわち、後続車の運転者と同乗者) の被った非金銭的損失を、後続車の車種と前方車の車種のマトリックスで示したものである。一方、表 6 は、前方車の非金銭的損失を示したものである。表 5 をみると、後続車がどの車種であろうが、前方車が普通・小型貨物車や普通・小型乗合車の場合に、後続車の損失が大きくなっていることが分かる。これは、この場合は前方車には大型車が含まれ、地面と車台との隙間の大きいものが多く、これに追突した場合に、1 当車が車台の下に潜り込み大きな被害が発生すること等に起因していると推測される。次に表 6 をみると、前方車の被る非金銭的損失は、全体として、後続車の被る損失よりも大きくなっている。これは、すでに述べたように追突事故特有の現象である。また、後続車が普通・小型貨物車や普通・小型乗合車の場合に、前方車の損失が大きくなる傾向にある。なお、この表 5 と表 6 の数値は、(1)(2)(3)式で示した便益の計算式のパラメータ $v_{k,l}$ 、 $w_{k,l}$

として用いる。

表 5 1 事故あたり後続車両乗員の非金銭的損失 $v_{k,l}$ (2012 年)

前方車	後続車	乗合		乗用車		貨物車		全車種平均	
		普通・小型	普通・小型	自家用普通・小型	事業用普通・小型	軽	普通・小型		軽
乗合	普通・小型		58.6	181.7	8.3	23.8	32.2	27.4	99.6
乗用車	自家用普通・小型		3.6	5.9	4.3	6.7	15.0	9.2	7.5
	事業用普通・小型		3.2	4.3	3.1	3.6	21.2	4.7	5.9
	軽		3.0	4.5	5.3	4.2	10.5	9.6	5.4
貨物車	普通・小型		7.5	13.1	5.5	11.6	73.6	53.0	31.7
	軽		1.4	4.1	1.8	2.8	7.0	3.9	4.1
全車種平均			5.0	6.1	4.2	5.8	22.9	12.3	8.6

注) $10,000 \times \text{死亡者数} + 353 \times \text{重傷者数} + 11 \times \text{軽傷者数}$ として算出

表 6 1 事故あたり前方車両乗員の非金銭的損失 $w_{k,l}$ (2012 年)

前方車	後続車	乗合		乗用車		貨物車		全車種平均	
		普通・小型	普通・小型	自家用普通・小型	事業用普通・小型	軽	普通・小型		軽
乗合	普通・小型		48.6	17.0	9.3	14.1	13.1	5.3	15.5
乗用車	自家用普通・小型		11.3	12.7	13.2	13.1	19.7	11.2	13.6
	事業用普通・小型		11.1	11.0	11.8	11.8	10.9	10.8	11.2
	軽		11.1	12.5	12.4	11.9	25.3	11.7	13.5
貨物車	普通・小型		68.6	16.6	12.5	18.1	38.4	12.2	22.4
	軽		10.3	15.0	11.5	12.8	30.9	12.6	16.4
全車種平均			20.0	13.1	12.6	12.9	24.9	11.6	14.4

注) $10,000 \times \text{死亡者数} + 353 \times \text{重傷者数} + 11 \times \text{軽傷者数}$ として算出

5. 便益と装着義務化の効果の計測結果

ここでは、乗用車の 2 車種（自家用普通・小型、軽）を対象に、追突事故防止から得られる便益を、自律型と車車協調型について計測する。また、車車協調型については、道路運送車両法における道路運送車両の保安基準を強化し、装置の装着を義務づけるという政策が、ユーザの便益にどのような影響を与えるのかを計測する。

5.1. 便益の計測結果

図 1 は、自律型と車車協調型それぞれの、私的限界便益と社会的限界便益を示している。自律型における社会的限界便益とは、装置を装着する限界ユーザの私的限界便益（(1)式）に、このユーザの装置の購入によって、この車を後続車とする追突事故が

減少するという他のユーザの享受する外部性便益（(2)式）を加えたものである。一方、車車協調型における社会的限界便益とは、装置を装着する限界ユーザの私的限界便益（(3)式）に、この限界ユーザと通信することによって、既に装置を装着したユーザの追突事故遭遇確率が減少するというネットワーク外部性効果を加えたものである。

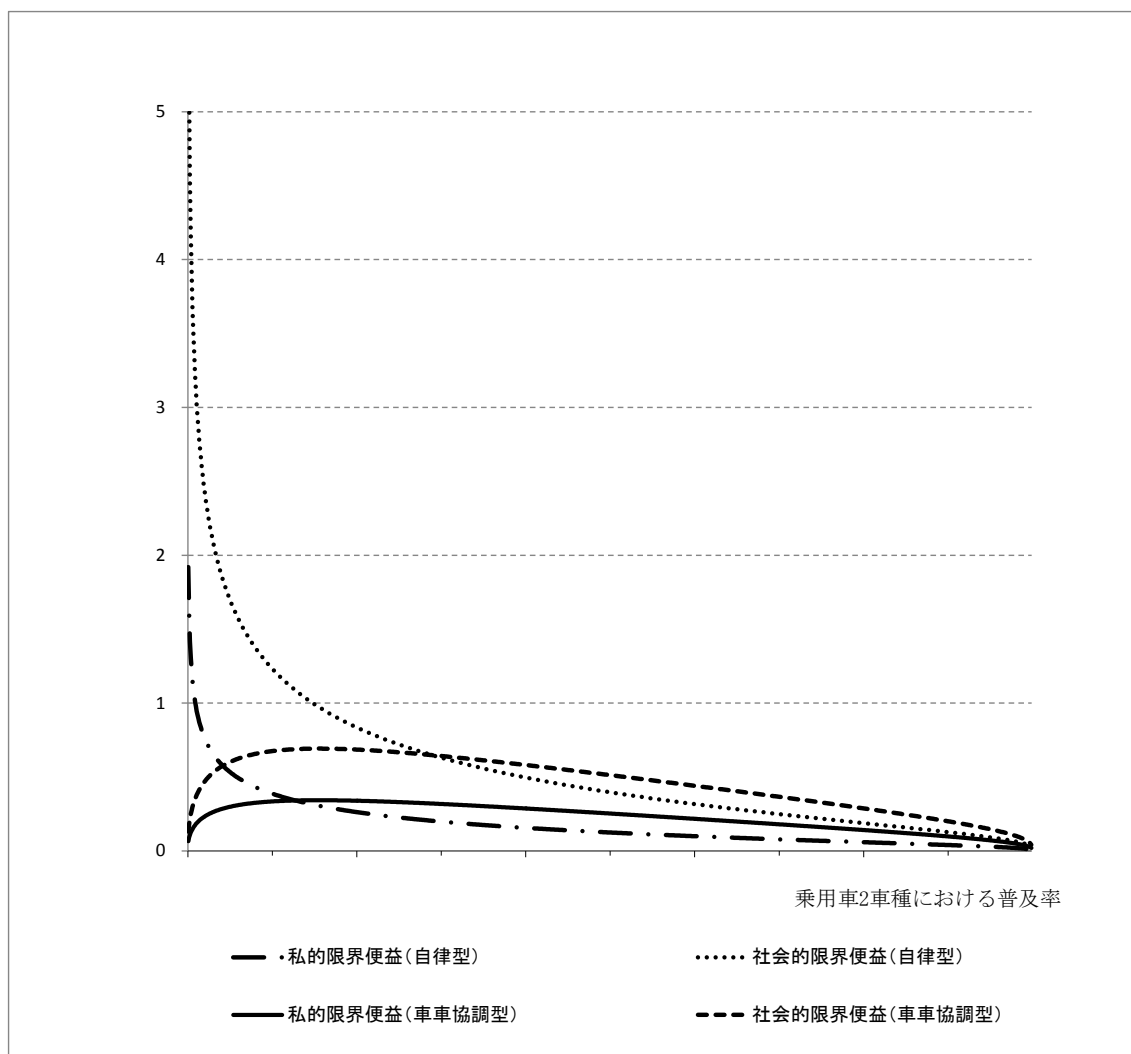


図1 私的限界便益曲線と社会的限界便益

この図をみると、自律型と車車協調型ともに、私的限界便益と社会的限界便益との乖離は大きく、最適普及水準を達成するためには購入補助（または購入しないことに対する課金）が必要となることが分かる。追突事故では、後続車よりも前方者の被害の方が大きいから、自律型では、私的限界便益を上回る限界外部効果が生じる。車車協調型では、私的限界便益をわずかに上回る限界外部効果が生じる。自律型と車車協調型ともに私的限界便益よりも限界外部効果が大きいということは、装置の最適普及水準を達成するためには、それぞれ価格の半分以上を、補助しなければならないことを示す。

図2は、追突事故による非金銭的損失の全額を1とした場合に、装置の普及率の上昇

にしたがって、その損失がどのように減少していくのを示している^{iv}。これによれば、同じ普及率での効果は、車車協調型が自律型に比べて低くなる。これは車車協調型の場合、2台の車が共に装置を装着している場合にのみ機能し、効果の現れが遅くなることに起因する。

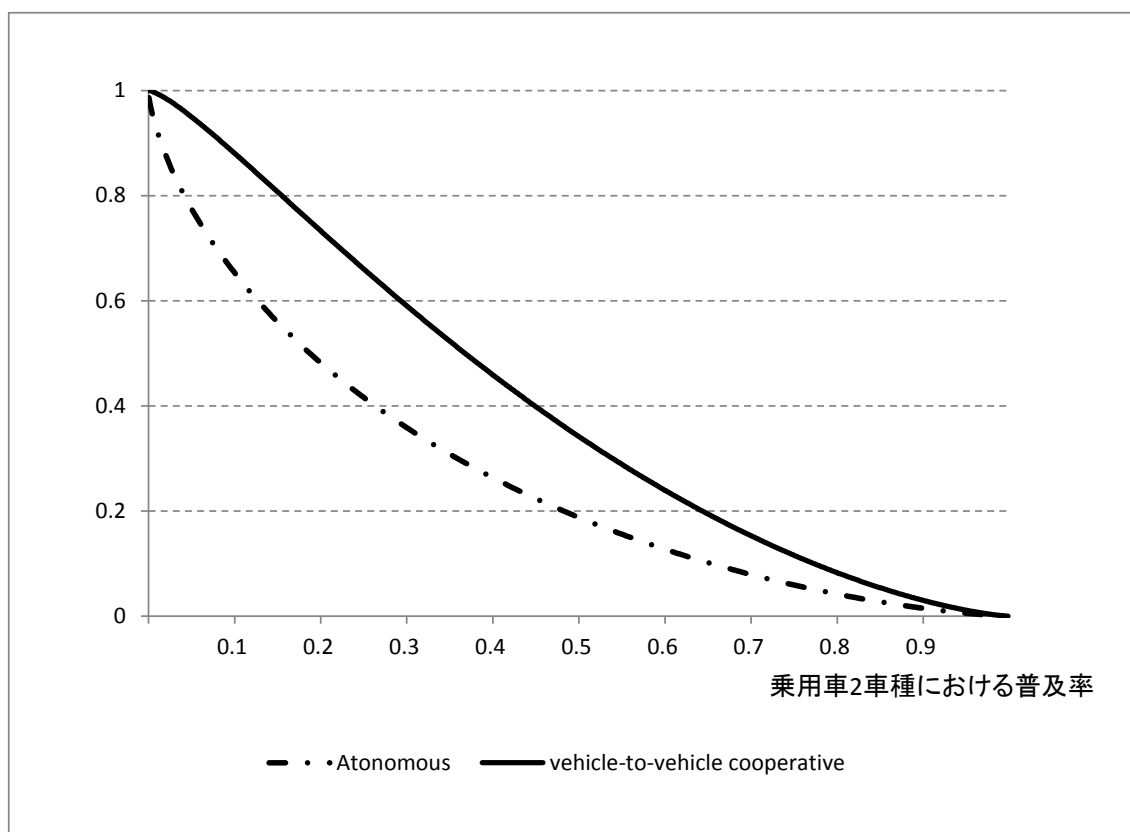


図 2 普及率と非金銭的損失との関係

5.2. 装置の装着義務課の効果

自動運転関連の保安基準については、日本では、衝突被害軽減ブレーキの大型バス・トラックへの装備義務化が決定され、新型車については 2014 年から開始されている。また、車両総重量 3.5 トン以上のバス・トラックについては、車線逸脱警報装置 (LDWS) の装備義務化が決定され、2017 年より開始される。こうした保安基準の強化による装着義務化は便益にどのような影響を与えるのであろうか。ここでは車車協調型についてそれを考える。

図 3 は、車車協調型について、① Case 1: 普通・小型事業用乗用車 (タクシー) と普通・小型乗合車 (自家用と事業用のバス) のすべてが車車協調装置を装着した場合、② Case 2: 普通・小型貨物車 (自家用と事業用) の 20% が装着した場合、③ Case 3: 普通・小型貨物車の 50% が装着した場合の 3 つのケースについて、乗用車ユーザの私

的限界便益がどのように変化するかをみたものである。なお、図の中の **BASE** ケースの曲線は、乗用車以外の車種が全く装着しない場合の乗用車の私的限界便益、すなわち、図 1 の車車協調型の私的限界便益曲線と同じものである。

これによると、装着義務化は、私的限界便益曲線を押し上げ、その押し上げ効果は、**Case 3**, **Case 2**, **Case 1** の順に大きい。ネットワーク外部性を有する財・サービスの私的限界便益曲線は **BASE** ケースのように逆 U 字型となる。このため、仮に装備の価格が **0.25** とすれば、**BASE** ケースでは、 f_1 の f_2 の 2 つの均衡点がある。 f_1 はクリティカル・マスとよばれ、この閾値を超えると普及が進み f_2 の均衡点に向かう。当然のことではあるが、他車種での装着義務化は、この閾値をより小さくする。**Case 1** と **Case 2** では、閾値自体が存在しなくなり、乗用車の車載装置の普及にとって大きな効果を持つことが分かる。

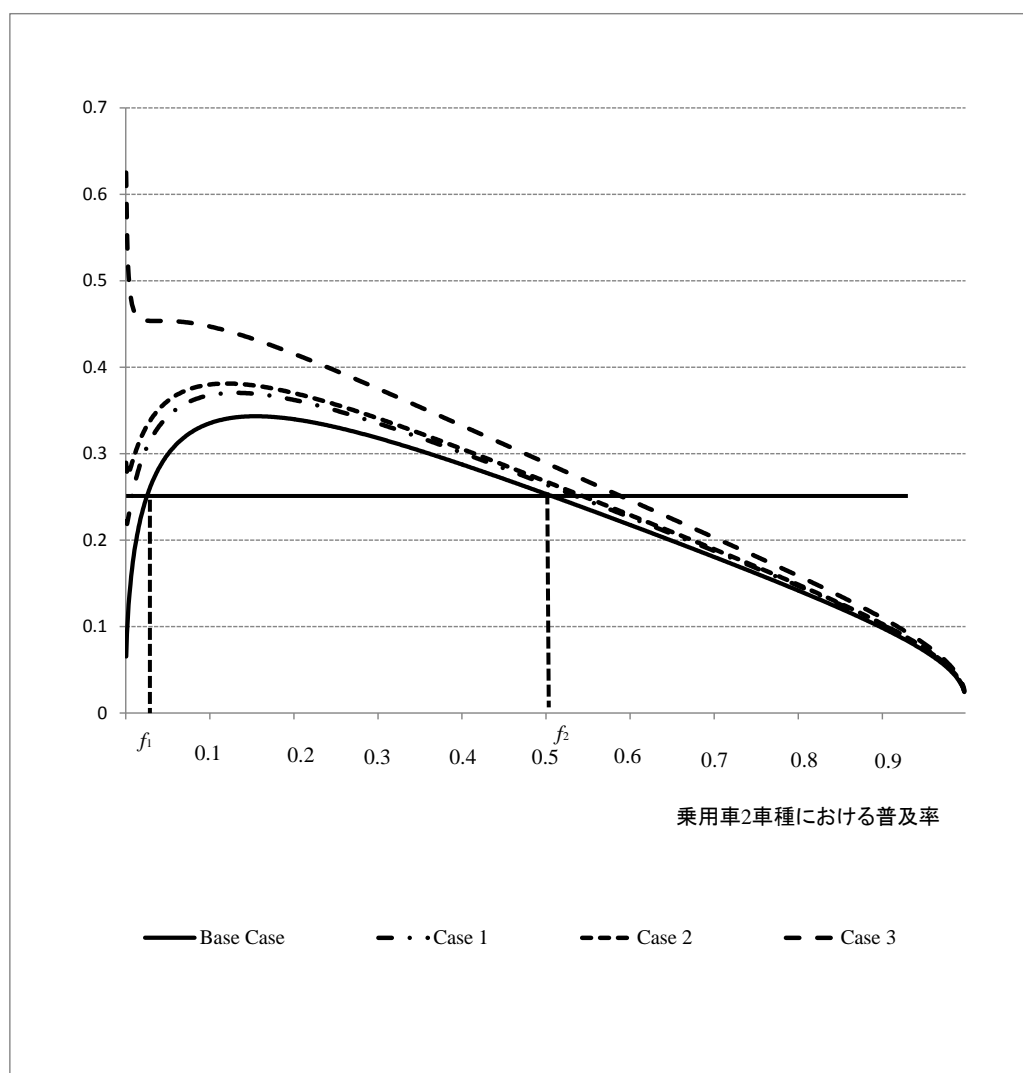


図 3 車載器の装着義務化による車車協調型の私的限界便益の変化
一方、装置の装備を義務化された側にはどの程度の便益が生じるのだろうか。図 4 は

装備義務化車両 1 台に生じる平均便益（非金銭的損失の回避）を示したものである。図中の普通・小型事業用乗用車と普通・小型乗合車とは、上述した Case 1 の場合の、両車種 1 台に生じる平均便益を示す。この内、普通・小型事業用乗用車の享受する便益が他に比べて大きくなっている。これは普通・小型事業用乗用車 1 台あたりの追突事故の相対的な多さに起因している。

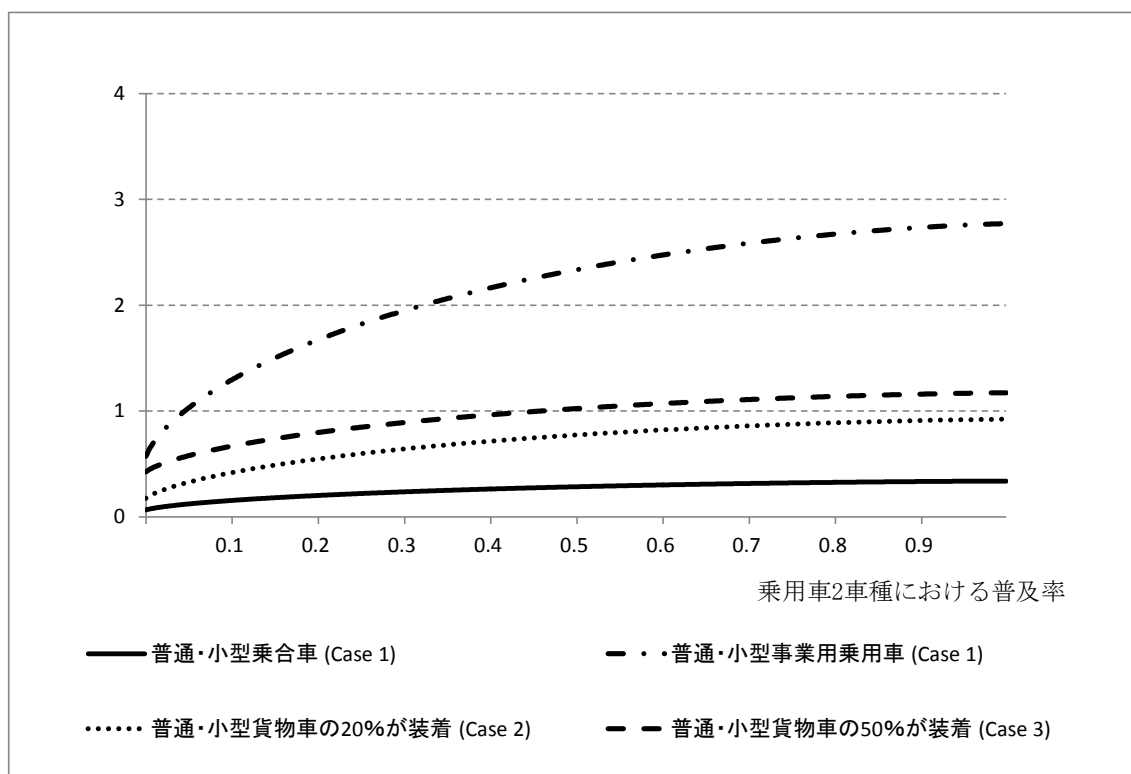


図 4 装着義務車両 1 台に生じる平均便益

6. むすび

以上、本稿では、追突事故を対象として、自立型、車車協調型それぞれの経済的性質を考慮して私的便益と社会的便益を計測した。そして、車車協調型については装着義務化の効果を計測した。この結果、1) 自立型、車車協調型共に、最適普及水準を達成するためには価格の半分以上を補助する必要があること、2) 装着義務化は私的便益曲線を押し上げクリティカル・マスを小さく、あるいは消滅させる効果があること、等を示した。

今後、この研究は、モデルの厳密化、計測対象便益の拡大、他の事故類型の分析、という 3 つの方向で拡張していく。まず、モデルの厳密化についてであるが、本稿では追突防止装置の装着によって追突事故が 100%回避し得ると仮定したが、これは非現実的である。これについては、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

ムで実施されている交通事故シミュレータによる分析結果等を用いて、パラメータを精緻化する必要がある。次に、計測対象便益の拡大については、本研究で計算対象とした非金銭的損失以外の重要な便益、たとえば、運転の快適さ等の便益を取り入れていく必要がある。これなしには、本来、各装置の便益の大きさは議論できない。この便益を取り入れるためには、アンケート調査によって、事故防止装置に対するユーザの支払意額を調査する必要がある。最後に、他の事故類型の分析については、まずは、右折事故、出会い頭事故等の他の車両相互事故を分析対象とする。本研究では、自律型と車車協調型という2つのシステム方式を考えたが、右折事故や出会い頭事故では、路車協調方式も事故を防ぐシステム方式となり得るため、この方式の経済的特色を考慮した便益計測モデルを追加し、便益の大きさや便益の発生形態を、自律型、車車協調型、路車協調型という3つのシステム方式間で比較する必要がある。

参考文献

—日本語文献—

- 内閣府『交通事故の被害・損失の経済分析に関する調査報告書』2012年3月
内閣府『SIP（戦略的コミットメントイノベーション想像プログラム）自動走行システム研究開発計画』2014年
一般社団法人日本自動車工業会『2013年度乗用車市場動向調査』2014年3月
横田敏幸・上田敏「AHSの費用便益分析」『土木計画学研究・講演集』vol. 20(2), 1997
pp.223-226

—外国語文献—

- Anderson, R., S. Doecke, J. Mackenzie, G. Ponte, D. Paine and M. Paine (2012). *Potential Benefits of Forward Collision Avoidance Technology*, University of Adelaide.
- Anderson, J. M., K. Nidha, K. D. Stanley, P. Sorenson, C. Samaras, and O. A. Oluwatola (2016). *Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers*, RAND Corporation.
- Fitch, G., H. Rakha, M. Arafah, M. Blanco, S. Gupta, R. Zimmermann, and R. Hanowski (2008). *Safety Benefit Evaluation of a Forward Collision Warning System*, Virginia Tech Transportation Institute.
- Jeong, E., and C. Oh (2015), Evaluating the Effectiveness of Integrated Active Vehicle Safety Systems, *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.

Rohlf, J.H., 1974. A theory of independent demand for a communications service,
Bell Journal of Economics and Management Science, vol. 5(1), pp. 16–37.

U.S. Department of Transportation (2015), *Benefits Estimation Framework for Automated Vehicle Operations*.

ⁱ 警察庁『交通事故統計データ』の「死亡」とは、交通事故によって、発生から 24 時間以内に亡くなった場合を指す。「重傷」とは、1 箇月（30 日）以上の治療を要する場合を、「軽傷」（「軽傷者」）とは、1 箇月（30 日）未満の治療を要する場合を指す。

ⁱⁱ 内閣府(2012)の負傷区分 O と負傷区分 A の違いは 後遺ありとなしの違いである。

ⁱⁱⁱ 進路変更を行った前方四輪車と後続の直進四輪車が衝突した場合の基本過失割合は、前方者が 7 割、後続車が 3 割とされている。したがって、この場合は、前方者が 1 当、後続車が 2 当となる。

^{iv} 普及率 100%での生じる便益は、車車協調型よりも自律型のほうが大きい。なぜならば自律型の場合には、乗用車 2 車種（普通・小型、軽）の装置の装着が、その他の 4 車種に対して、後方からの追突事故の減少という外部効果を与えるからである。車車協調型ではこの効果は生じない。