



RIETI Discussion Paper Series 22-J-035

自動車の完全自動運転下における損害賠償ルールと 安全性能の選択

日引 聡
経済産業研究所

新熊 隆嘉
関西大学

吉田 惇
九州大学



Research Institute of Economy, Trade & Industry, IAA

独立行政法人経済産業研究所

<https://www.rieti.go.jp/jp/>

自動車の完全自動運転下における損害賠償ルールと安全性能の選択[#]

日引 聡（東北大学、経済産業研究所コンサルティングフェロー）

新熊隆嘉（関西大学）

吉田 惇（九州大学）

要 旨

完全自動運転自動車が社会に普及した場合、事故確率や被害額は自動車性能のみによって決まるため、事故責任は自動車性能のみに帰する。このため、被害額の負担について、損害賠償制度による解決に加え、製造物責任による解決が可能となる。事故被害の負担ルールは、自動車製造業者や自動車利用者の安全性能の選択や利用者の自動車利用頻度に影響を与える。Shavell (2020)は、自動車利用者の意思決定に焦点を当て、ファーストベストを実現するためには、事故当事者が自分の被害額を自己負担するとともに、相手の被害額を政府に支払う損害賠償制度（Shavell ルールと呼ぶ）が必要なことを示している。本論文で、Shavell (2020)を安全性能の技術開発を考慮したモデルに拡張すると、ファーストベスト実現のためには、(1) 個人の効用関数が同一の場合、Shavell ルールでは、過大な安全性能技術が開発されるため、安全性能に応じた自動車購入税、あるいは、技術開発税の導入が必要、(2) このとき、自動車利用に応じたフェアプレミアムな損害保険が利用可能な場合には、(1) と同等の政策が必要、(3) 効用関数に異質性があると、技術開発のインセンティブを強める必要が生じる場合があり、その場合、自動車購入補助金、あるいは、技術開発補助金への変更が必要、(4) 製造物責任制度の下では、自動車利用税及び自動車購入補助金の実施が必要となることを示す。

キーワード：完全自動運転、損害賠償制度、製造物責任、安全性能

JEL classification: K13

RIETI ディスカッション・ペーパーは、専門論文の形式でまとめられた研究成果を公開し、活発な議論を喚起することを目的としています。論文に述べられている見解は執筆者個人の責任で発表するものであり、所属する組織及び（独）経済産業研究所としての見解を示すものではありません。

[#] 本稿は、独立行政法人経済産業研究所（RIETI）におけるプロジェクト「人工知能のより望ましい社会受容のための制度設計」の成果の一部である。本稿の原案に対して、プロジェクトリーダーの馬奈木俊介教授（九州大学）、東田啓作教授（関西学院大学）、松川勇教授（武蔵大学）、實多康弘教授（南山大学）、森田果教授（東北大学）はじめプロジェクトメンバー、ならびに経済産業研究所ディスカッション・ペーパー検討会の方々から多くの有益なコメントを頂いた。ここに記して、感謝の意を表したい。

第1節 はじめに

私たちは普段自動車を利用することでさまざまな便益を受けている。一方、自動車の利用は事故を引き起こす可能性があり、事故被害という社会的費用を発生させる。自動車の利用頻度が多くなるほど、事故件数は増加する。しかし、安全性能の高い自動車を利用することで、事故発生確率を低下させたり、事故の被害額を減少させることができる。事故に関する損害賠償ルールは、個人が事故を起こした場合の事故被害額の費用負担に影響を与え、個人の自動車の利用頻度や安全性能（たとえば、対物センサーの有無など）の選択などに影響を及ぼす。このため、経済厚生を最大にするような自動車利用や安全性能の選択を促進するために、損害賠償ルールの設定が重要な役割を果たす。

現在、AIなどを活用した自動車の自動運転技術の開発が進められている。後述するように、国土交通省によると、自動運転のレベルは、現状を含め、大きく分けて6段階（レベル0～5）ある。レベル5の自動運転は、個人がまったく運転に関わらず、自動車が自律的に走行するものとなっている。現在私たちが使用している自動車の場合、事故が起こる確率や被害額は、個人の運転技術や過失の有無、自動車の安全性能によって決定される。しかし、完全自動運転自動車の場合、それらは自動車の安全性能のみによって決定される。国土交通省によると、日本においては、2025年を目途に高速道路での完全自動運転が実施されるようになるという。将来、すべての自動車が完全自動運転化された社会において、どのような損害賠償制度あるいはそれに代わる制度を整備することが、社会的に望ましいだろうか？

自動車が完全自動運転化された社会において、事故が生じた場合の被害額の負担ルールについては、いくつかの方法が考えられる。第一の方法は、損害賠償制度によって、事故の当事者（以下では、自動車の運転手を想定）に、事故の被害額を負担させる方法である。第二の方法は、事故を製造物責任（自動車の不十分な性能あるいは欠陥）にとらえ、事故被害の責任を企業に負わせる方法である。現在の自動車は、自動運転ではなく、運転手が自動車を操作するため、自動車の安全性能だけでなく、個人の運転技術や過失の有無が事故確率や被害額に影響を与える。しかし、完全自動運転が可能な自動車であれば、事故やその被害額の大きさは、個人によって影響を受けないため、事故の責任は自動車性能のみに帰すると考えることができるからである。

事故は、事前の事故回避行動によって、その発生確率や被害を減少することが可能である。たとえば、自動車と歩行者の事故を考えると、潜在的な運転手が、より安全性能の高い自動車を使用したり、運転手が速度を抑制し、また、不注意な運転を避けることで事故発生確率や被害を減少できる。歩行者も、車に注意をして歩行したり、夜間などは車のライトに反射しやすい衣服を着用することで、発生確率や被害を抑制できる。しかし、事故回避行動を強めるには追加的な費用（不便さも含め）がかかるために、加害者や被害者に最適な事故回避行動を選択させるインセンティブを与えることが必要となる。事故に関する損害賠償ルールは、事故が生じたときにどのように加害者や被害者に被害額を負担させるかを取り決めるものである。このルールをどのように設定するかによって、加害者や被害者の事故回避行動のインセンティブが変わる。このため、損害賠償ルールの設計に関する多くの研究が行われてきた（Calabresi (1961)、Posner (1972)、Brown(1973)、Diamond(1974)、Shavell(1980)、Emons and Sobel(1991)など）。Brown (1973)は、

交通事故のように加害者と被害者の事故回避行動によって事故確率が影響を受けるようなケースにおいて、厳格責任ルールでは、被害者の事故回避行動を最適な水準に誘導できないが、過失責任ルールであれば、両者の行動を最適な水準に誘導できることを明らかにし、Shavell(1980)は、事故回避行動の選択に加え、加害者らの活動頻度（たとえば、自動車の利用回数）を考慮した分析を行うと、過失責任ルールの下では、加害者の活動水準（運転手の自動車利用回数）が過大になるため、事故回避行動と活動水準を最適な水準に誘導することができないことを明らかにしている。また、Diamond(1974)、Calfee and Craswell(1984)他は、過失責任ルール下において、過失判定に不確実性がある場合の注意水準の選択の問題を扱っている。近年は、自動車の完全自動運転技術の発達により、将来の完全自動運転の実現を想定した社会における、最適な損害賠償ルールの設計に関する研究がいくつか行われている。Shavell(2020)は、この分野における最初の論文で、自動車同士の自動車事故を対象に、自動車利用者の自動車利用頻度と自動車安全性能の選択という2つの意思決定を考慮した理論モデルを構築し、厳格責任ルールでは、自動車利用による被害額が完全に内部化できないために、自動車の利用頻度を過大にするとともに、低い安全性能を選択するインセンティブを与えることを明らかにした。このため、最適な自動車利用と安全性能の選択を実現するための損害賠償ルールとして、事故の当事者それぞれが、自分の被害額を自己負担とするのに加え、相手が負った被害額を政府に支払う損害賠償制度（以下では、Shavellルールと呼ぶ）を提案している。また、De Chiara 他（2021）は、完全自動運転と現在のように人間による自動車運転が混在する社会においては、過失責任ルールより厳格責任ルールの方が、R&D 投資により強いインセンティブを与えることができ、望ましいことを明らかにしている。

本論文の目的は、第一に、完全自動運転が実現した社会において、安全性能に関する技術開発を考慮すると、Shavellルールだけでは、最適な自動車利用と安全性能の実現は困難であり、追加的な政策の組み合わせが必要であること、第二に、製造物責任制度を活用する場合に、追加的に必要な政策は何かを示すことにある。第一の目的に関しては、個々人が同じ効用関数をもつケースにおいては、技術開発のインセンティブを弱めるために、安全性能に応じた自動車購入税、あるいは、技術開発税の導入が必要であることを示す。次いで、個々人が異なる効用関数をもつケースにおいては、条件によって、技術開発のインセンティブを強める政策が必要となるケースが生じ、その場合には、自動車購入補助金あるいは技術開発補助金に変更する必要があることを示す。第二の目的に関しては、製造物責任制度を実施する場合には、個々人の自動車利用によって生じる事故の被害額を内部化するために、自動車利用税の導入が必要な一方、高い安全性能の技術開発のインセンティブを与えるために、自動車購入補助金が必要なことを示す。

私たちのモデルと、Shavell(2020)のモデルとの違いは、技術開発を明示的に考慮しているかどうかという点にある。Shavell(2020)では、開発済みの安全性能（たとえば、エアバック、対物センサーなど）に関して、自動車利用者が性能選択する問題を分析対象としており、技術の開発の問題を扱っていないが、私たちのモデルでは、安全性能技術開発（たとえば、より安全性能の高い完全自動運転システムのソフトウェアの開発など）を考慮したモデルになっている。言い換えると、Shavell(2020)では、自動車製造企業の行動を明示的に考慮せず、自動車利用者と生産者との間の市場均衡を捨象しているが、私たちの

モデルでは、自動車製造企業の技術開発行動を明示的に組み込んだうえで、財市場の均衡を考慮している。安全性能の高い製品を開発することによって消費者に発生する便益の増加は、消費者の支払い意思額を高めるため、より高い価格が設定される。このため、技術開発の利益がどの程度生産者の利益として還流されるかが、技術開発のインセンティブに影響を与える。本論文のモデルは、企業の技術開発行動を明示的に考慮することで、Shavell(2020)が明らかにしていないメカニズムを通じて、Shavell ルールでは、最適な安全性能を実現できず、自動車購入に際し、自動車購入税や技術開発税、または、自動車購入補助金や技術開発補助金などの政策が追加的に必要であることを明らかにしている。

以下、第2節では、自動運転の現状について説明し、第3節では、完全自動運転可能な自動車を前提に、最適な自動車利用頻度や安全性能の選択条件について説明する。第4節では、損害賠償制度の下で、個人が同じ効用関数をもつ場合、ファーストベストを実現するためには、Shavell ルールに加え、安全性能に応じた自動車購入税あるいは技術開発課税が必要なことを示し、第5節では、個人の効用関数が異なる場合には、Shavell ルールの下では、補助金が必要となるケースが存在することを示す。第6節では、損害保険が存在する場合、損害賠償制度の下で必要となる政策について議論する。第7節では、製造物責任制度の下において、自動車利用税と自動車購入補助金が必要な一方、技術開発課税あるいは補助金が必要ないことを示す。第8節で結論を取りまとめる。

第2節 自動運転の現状

現在、ステアリング操作やブレーキ操作など一部の運転操作が不要になる自動運転技術が開発され、それを搭載した車が複数の自動車メーカーから販売されている。将来的には、交通状況を車両側で判断し、人が全く運転操作に関わらない完全自動運転の自動車が誕生すると言われている。

自動運転は、人間がどの程度運転操作に関与するかに応じて0～5までの6つのレベルに分けられている。レベル0は、ドライバーが全ての運転タスクを担うものである。具体的には先進運転支援システム(Advanced Driver-Assistance Systems)を搭載していない旧型の自動車がこれに該当する。レベル1は、運転システムがステアリング操作とアクセル・ブレーキ操作による加減速の制御のいずれかを実行するものである。例えば、ACCやLKAが相互に連携しない車両がそれに該当する。レベル2は、このステアリング操作とアクセル・ブレーキ操作をシステムが同時に行い運転をサポートする。ただし、レベル2までは、いかなる条件下でもステアリングを離れたまま走行することはできず、運転手が運転状況を常に監視する必要がある。このように、レベル2までは運転操作の主体はドライバー(人間)である。

これに対して、レベル3以上では運転操作の主体はシステムである。レベル3は、限定された条件下でシステムが全ての運転操作を実行する。ただし、条件から外れたり、作動継続が困難な場合などの緊急時には、運転者はただちに通常の運転に戻らなければならない。レベル4は、全ての運転操作および作動継続が困難な場合への対応を限定領域内で実行する。レベル5ではこの限定領域も外れ、常にシステムが全ての運転操作を行う。レベル3とレベル4以上の違いは、緊急時であっても利用者が介入する必要はないという点

である。官民 ITS 構想・ロードマップ 2019 によれば、2025 年をめどに高速道路におけるレベル 4 の実現を目指すこととしている。

自動運転の技術の向上にあわせて世界的に法律の改正が進められている。日本でも 2020 年 4 月から改正道路交通法が施行され、レベル 3 の自動運転技術を搭載した車が公道を走行できるようになった。改正前の道路交通法では、人が運転することを前提に安全運転の義務が定められており、自動運転システムが運転の主体となって走行する際の規定がなかった。改正道路交通法では、自動運行装置による走行も「運転」と定義されるとともに、システムから運転の要請があった場合は、ただちに運転操作に戻れることが運転者の義務として明記された。したがって、運転者は自動運転中に運転状況から目を離すことはできるものの、飲酒や居眠りをすることはできない。レベル 3 は原則的にはシステム側の責任において全ての運転操作が行われるものの、上記の義務があるため、事故や違反時に必ずしも運転者が免責されるとは限らない点に注意が必要である。

事故時に運転者が免責になるかどうかは、交通事故の発生確率に影響を及ぼす。仮に法律で免責とされた場合、運転者は事故に対する責任を負わないので、運転席以外に座ったり、居眠りや飲酒をするなど、システムからの要請に即座に応答できないような行動をとるかもしれない。また、免責でなくとも、長く使用することでシステムの機能と安全性に対する過信や慢心が生まれ、警告を無視する運転者が増えるかもしれない。実際、レベル 2 車両ではあるが、米国テスラ車のオーナーがシステムからの要請を無視して交通事故を引き起こしてしまった。では、レベル 4 以上の（緊急時であってもシステムが対処する場合、責任の所在は開発した企業にあるのか、利用者は完全に免責でもよいのだろうか。レベル 4 以上の場合であっても、どこをどのくらいの距離または頻度走行するかは利用者に委ねられる。利用頻度が増加するほど、自分以外の運転者に遭遇する可能性は高まり、事故の発生頻度が増加する。その場合、利用者が免責でないならば、過剰な利用を抑え、事故の発生頻度が下がるであろう。逆に、運転者（自動運転搭載車の利用者）に全責任が及んだ場合、企業は高い費用や時間をかけて安全性のチェックや事故後の精査を実施しないかもしれない。この場合、自動運転技術の安全性は社会的に望ましい水準にはならないであろう。

以上のように、運転操作の主体がシステムであっても、責任の所在をどのようにするかは企業や自動運転利用者の行動に影響を与えるため、注意深い議論が必要である。第 3 節以降では、レベル 5 の完全自動運転車を対象に、最適な自動車利用と安全性能の選択について述べる。

第3節 モデルの設定と最適化条件

いま、社会に N 人の個人が存在し、個人 i ($i \in N$) が自動車を利用するとき、自動車の使用 q_i から効用 $U_i(q_i)$ を得ることができる場合を考える。ただし、1 回の自動車利用当たり 1 時間運転するものとし、 q_i は一定期間 T における自動車の利用回数とする。一定期間 T において、個々の個人にとって、最大で T 時間の自動車使用が可能であり、 $q_i < T$ であると仮定する。個人 i が個人 j と遭遇する（同じ時間帯に自動車を利用する）期待頻度 H_{ij} は $H_{ij} = f(q_i, q_j)$ である。ただし、対称性、すなわち、 $f(q_i, q_j) = f(q_j, q_i)$ と $f(q_i, q_i) = 0$ を仮定する。これは、たとえば、 i と j の利用頻度がそれぞれ 5 回と 10 回の際の期待遭遇

頻度は、 i と j の利用頻度がそれぞれ 10 回と 5 回のときの期待遭遇頻度が同じなると考えられるからである。また、個人 A 、 B の自動車の利用頻度が多いほど、両者の遭遇する確率は高くなるので、 $\frac{\partial H_{ij}}{\partial q_i} = f_1 \equiv \frac{\partial f}{\partial q_i} > 0$ 、 $\frac{\partial H_{ij}}{\partial q_j} = f_2 \equiv \frac{\partial f}{\partial q_j} > 0$ 、 $\frac{\partial^2 H_{ij}}{\partial q_i \partial q_j} = f_{12} = \frac{\partial^2 H_{ij}}{\partial q_j \partial q_i} = f_{21} > 0$ と仮定する。

いま、簡単化のために、市場では、安全性能について 1 種類の自動車が販売されており、安全性能 x をもつ自動車が遭遇した際に生じる事故確率を $p(x)$ とする。ただし、 $p'(x) < 0$ 、 $p''(x) > 0$ と仮定する。このとき、個人 i の事故の期待頻度 F_i は、

$$F_i(q_i, q_j, x) = p(x) \int_0^n f(q_i, q_j) dj$$

となる。ただし、 n は N 人のうち自動車を利用（購入）する人数を表している。簡単化のために、個人 i が事故に遭遇した場合に自分に生じる被害額を D_i （一定）とすると、事故によって生じる被害総額の期待値 TD_i は、

$$TD_i(q_i, q_j, x) = p(x) \int_0^n D_i f(q_i, q_j) dj \quad (1)$$

となる。

一方、競争的な代表企業が安全性能 x の自動車を生産する際の費用関数は $TC(n, x)$ であり、 $\frac{\partial TC}{\partial n} > 0$ 、 $\frac{\partial TC}{\partial x} > 0$ 、 $\frac{\partial^2 TC}{\partial n \partial x} > 0$ を仮定する。 $\frac{\partial TC}{\partial n \partial x} > 0$ において、安全性能を引き上げると、限界費用が増加することを仮定している。また、以下では、 TC には、安全性能 x の技術の開発費用も含まれているため、 $\frac{\partial TC}{\partial x}$ は安全性能を引き上げたときに生じる開発費用の増加と生産費用の増加の両方を含めたものと解釈する。

以上から、安全性能 x の自動車が生産されるときに社会厚生 SW は次式で表すことができる。

$$SW = \int_0^n U_i(q_i) di - TC(n, x) - p(x) \int_0^n \int_0^n D_i f(q_i, q_j) dj di$$

このとき、社会厚生最大化条件は、次式で表すことができる。

$$\frac{\partial U_i(q_i^*)}{\partial q_i} = p(x^*) \int_0^n (D_i + D_j) f_1(q_i^*, q_j^*) dj \quad [\because f_1(q_i^*, q_j^*) = f_2(q_j^*, q_i^*)] \quad (2)$$

$$\frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial x} = -p'(x^*) \int_0^n \int_0^n D_i f(q_i^*, q_j^*) dj di \quad (3)$$

$$U_n(q_n^*) = \frac{\partial TC(n, x^*)}{\partial n} + p(x^*) \left\{ \int_0^n D_{if}(q_i^*, q_n^*) di + \int_0^n D_{nf}(q_n^*, q_j^*) dj \right\} \quad (4)$$

ただし、 $q_i^*(x^*)$ は、最適な安全性能 x^* が選択されたときの、個人 i の最適な自動車利用を表している。

(2)式は、自動車を利用する個人の限界効用と自動車利用によって生じる社会的限界費用（すべての個人に生じる期待限界被害額の合計）の均等化が自動車利用に関する最適化条件となっていることを示し、(3)式は、安全性能に関する限界費用と安全性能の限界便益（期待被害額合計の減少）の均等化が最適な安全性能の条件となることを表している。

(4)式は、自動車利用者増加による効用の増加と生産量増加による社会的限界費用（生産の限界費用と限界事故被害額（自動車使用者が増えることによる事故被害額の増加）の合計）の均等化が、最適な生産量の条件となることを表している。

以下では、簡単化のために、すべての個人は同じ効用関数 $U(q_i)$ をもち、事故による被害額が同一（ D ）であるケースを考える。このとき、(2)、(3)、(4)式は下記のように書き換えることができる。

$$\frac{\partial U(q^*)}{\partial q} = 2Dp(x^*)n^*f_1(q^*, q^*) \quad (5)$$

$$\frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial x} = -Dp'(x^*)n^{*2}f(q^*, q^*) \quad (6)$$

$$U(q^*) = \frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial n} + 2Dp(x^*)n^*f(q^*, q^*) \quad (7)$$

第4節 市場均衡と最適な政策ルール：同質の個人のケース

事故を最適な水準に制御するためには、自動車の安全性能だけでなく、自動車の利用頻度を最適に制御する必要がある。自動車利用の抑制は、事故相手の被害を減らすため外部性を伴う。このため、Shavell(2020)は自動車利用の外部性を内部化するために Shavell ルールを提案している。本稿の目的は、技術開発を考慮する場合、Shavell ルールだけではファーストベストを達成できず、追加的な政策が必要であることを明らかにすることにある。このため、以下では、Shavell ルールが実施された場合、競争的市場均衡において、ファーストベスト実現のために、自動車購入税、技術開発税が必要なこと、また、その条件について示そう。

Shavell(2020)との比較のために、損害賠償ルール L として、3つのケース、すなわち、①事故が生じた場合、自分に生じた被害は自分で負担し、他者に生じた被害額について責任を負わないケース（無責任ルールと呼ぶ）、②他者に生じた被害額について責任を負うケース（厳格責任ルールと呼ぶ）、③自分に生じた被害は自分で負担し、他人に負わせた被害額を政府に納入するケース（Shavel ルールと呼ぶ）の3つのケースについて比較する。このとき、事故によって生じる個人 i の被害負担額は下記の通りになる。

$$L_i = \begin{cases} D_i = D & \text{無責任ルール} \\ D_j = D & \text{厳格責任ルール} \\ D_i + D_j = 2D & \text{Shavell ルール} \end{cases} \quad (8)$$

ただし、 $j \in 1 \dots n$ 及び $j \neq i$ である。また、自動車の購入時に課す自動車購入税 $TAX(x)$ が実施されているケースを考える。この税金は、個人が選択する安全性能によって決まるものとする。安全性能 x の自動車を使用する場合、事故による費用負担を考慮した個人 i の期待便益 B_i は次式の通りになる。

$$B_i = U_i(q_i) - p(x) \int_0^n L_i f(q_i, q_j) dj - TAX(x) \quad (9)$$

一方、自動車市場は完全競争市場であり、安全性能 x の自動車を生産する代表的な自動車生産企業の利潤関数 π は、次式で表される。

$$\pi = P(x)n - TC(n, x) - TAX_{R\&D}(x) \quad (10)$$

ただし、開発される安全性能に応じて課される技術開発税 $TAX_{R\&D}(x)$ が導入されており、 $P(x)$ は安全性能 x の自動車の市場価格である。また、以下では、事故によって被害が生じた場合の損害賠償責任は企業には生じず、自動車利用者にも生じることを想定している。

このとき、次の命題 1 が得られる。

(命題 1)

自動車市場が完全競争市場であり、以下の仮定を満たすものとする。

- (1) 自動車の安全性能に関して情報が完全である、すなわち、事故確率関数 $p(x)$ の正確な情報を自動車利用者及び自動車製造企業が知っている
- (2) すべての個人が同じ効用関数をもつ
- (3) すべての個人の被害額が同一である

このとき、損害賠償制度の下でファーストベストを実現するためには、Shavell ルールに加え、技術開発を抑制するインセンティブを与えるために、次式に表すような、安全性能に応じた自動車購入税 $TAX(x)$ または技術開発税 $TAX_{R\&D}(x)$ を導入する必要がある。

$$TAX_{R\&D}(x) = (1 - \alpha)t^*n^*x \quad (11)$$

$$TAX(x) = \alpha t^*\{x - x^*\} \quad (12)$$

ただし、 $t^* = -Dp'(x^*)n^*f(q^*, q^*)$ であり、 α は任意の値を示すパラメータである。

(証明)

(9)式から、期待便益を最大にする個人の自動車利用の条件は、次式のようになる。

$$\frac{\partial U_i(q_i^L)}{\partial q_i} = p(x^L)L_i \int_0^n f_1(q_i^L, q_j^L) dj \quad (13)$$

ただし、 q_i^L は、損害賠償ルール L において、安全性能 x が選択されたときの、個人 i の期待便益を最大にする自動車利用を表している。このとき、安全性能が x である自動車に対する個人 i の需要価格 $WTP_i(x)$ は次式で表される。

$$WTP_i(x) = U_i(q_i^L) - p(x^L) \int_0^n L_i f(q_i^L, q_j^L) dj - TAX(x) \quad (14)$$

このとき、(14)式から、市場需要価格 $P(x^L)$ は $P(x^L) = \min_i WTP_i(x^L)$ となる。ここで、すべての個人は同じ効用関数 $U(q_i)$ をもち、事故による被害額が同一 (D) であるケースを考えると、(13) 式は次式に書き換えられる。

$$\frac{\partial U(q^L)}{\partial q} = Lp(x^L)n^L f_1(q^L, q^L) \quad (15)$$

また、すべての個人の WTP は同一になるから、市場均衡において、市場価格 $P(x)$ は次式で決定される。

$$P(x^L) = U(q^L) - Lp(x^L)n^L f(q^L, q^L) - TAX(x^L) \quad (16)$$

一方、(16) 式を考慮すると、(10) 式より、市場均衡条件は次式に示すとおりである。

$$U(q^L) - Lp(x^L)n^L f(q^L, q^L) - TAX(x^L) = \frac{\partial TC(n^L, x^L)}{\partial n} \quad (17)$$

$$\frac{\partial TC(n^L, x^L)}{\partial x} = -Lp'(x^L)n^L f(q^L, q^L) - n^L \frac{\partial TAX(x^L)}{\partial x} - \frac{\partial TAX_{R\&D}(x^L)}{\partial x} \quad (18)$$

ただし、 n^L 、 x^L は、損害賠償ルールが L であった場合の利潤最大化条件によって決定される自動車生産量、安全性能である。

ここで、Shavell ルールにおいては、 $L = 2D$ であるから、(5)、(6)、(7)式と(15)、(17)、(18)式の比較から、ファーストベストを達成する $TAX(x)$ 、 $TAX_{R\&D}(x)$ の条件は下記の 2 つになる。

$$n^* \frac{\partial TAX(x^*)}{\partial x} + \frac{\partial TAX_{R\&D}(x^*)}{\partial x} = -Dp'(x^*)n^{*2} f(q^*, q^*) < 0$$

$$TAX(x^*) = 0$$

(11)、(12) 式は上記の条件を満たしている。なお、Shavell ルール以外の損害賠償ルールにおいては、(15) 式が (5) 式を満たさないため、ファーストベストを実現できない¹。

(証明終)

命題 1 は、 α を任意に選択することで、技術開発課徴金と自動車購入補助金を様々な組み合わせることで、ファーストベストを実現できることを示している。

$\alpha = 0$ を選ぶと、技術開発税のみを実施することが最適であり、その場合の課税額は、次式に示すとおりになる。

$$TAX_{R\&D}(x) = t^*n^*x$$

t^* は安全性能を引き上げることによって自動車利用者各個人に生じる期待被害額の減少を表しているため、 t^*n^* は、自動車利用者全員に生じる期待被害額の減少の合計を表している。

$\alpha = 1$ を選ぶと、安全性能に応じた自動車購入税のみを実施することが最適であり、その際、最適な課税は、次式に示すとおりになる。

$$TAX(x) = -Dp'(x^*)n^*f(q^*, q^*)\{x - x^*\}$$

上式からわかるように、最適な安全性能 x^* が選択された場合には、課税額は 0 となり、最適な安全性能より低い自動車が生産された場合には、安全性が低いほどより大きな補助金を与え、高い自動車が生産された場合には、過大な安全性能に対して課徴金を課す（安全性能が高いほど課徴金が高くなる）必要があることを示している。

Shavell ルールは、以下に説明するように、技術開発による社会的便益を超える過大な利益を生産者に与えるため、課税によってその利益を抑制する必要がある。

このような課税が必要な理由は、(6)式と(18)式の比較からわかるように、もし税が存在しなければ ($TAX = TAX_{R\&D} = 0$)、過大な安全性能の技術が開発されるからである²。Shavell ルールは、事故の相手方に発生する被害額を各個人に負担させるため、社会全体で発生する期待費用負担総額は $2Dp(x^*)n^{*2}f(q^*, q^*)$ となり、社会に発生する期待被害総額 ($Dp(x^*)n^{*2}f(q^*, q^*)$) の 2 倍となっている。このため、安全性能を引き上げることによって社会に発生する便益（期待被害額の減少）の 2 倍の便益が生じる結果、同額の価格上昇が生じ、生産者の利潤が増加する。そのことが、生産者に安全性能に対する過大なインセ

¹自動車利用税のような追加的な政策を考えれば、他の損害賠償ルール（無責任ルールや厳格責任ルール）でもファーストベスト政策が存在する。

² (5)及び(7)式と(15)及び(17)式との比較からわかるように、Shavell ルール ($L = 2D$) は、自動車の利用頻度と自動車の生産量を最適な水準に誘導できる。

ンティブを与えてしまう。このようなインセンティブを除去するために、超過負担分 ($Dp(x^*)n^*f(q^*, q^*)$) に比例する形で課税することが必要となる。

自動車購入課税については、市場均衡では実質的な税負担が生じない形になっている。これは、(17)式からわかるように、市場均衡において、課税によって自動車利用者に負担が生じてしまうと需要価格が低下し、生産量が過小になることを避ける必要があるからである。なお、自動車購入税は、税徴収の取引費用がかからないが、技術開発税には税徴収の費用がかかるため、行政費用の観点からは、自動車購入税の方が望ましいと考えられる。

上記の結果は、自動車生産者の研究開発のインセンティブを考慮に入れると、Shavell ルールだけでは、技術開発に対して適切なインセンティブを与えることができないことを意味している。

なお、比較のために、完全自動運転自動車のみが利用される社会になるまでの移行期間において、すなわち、現在私たちが利用している通常の自動車（以下では、普通自動車と呼ぶ）と完全自動運転自動車とが混在する社会において、Shavell ルールを使いつつ、ファーストベストを実現するための政策について、Appendix(1)で議論している。(命題 A) に示すように、普通自動車が混在し、安全性能を引き上げることの便益が普通自動車の利用者にスピルオーバーしたとしても、(命題 1) と同様に、R&D 課税は完全自動運転自動車の利用者に生じる安全性能の限界便益に等しい水準に課税額を設定する必要があることを示している。

第5節 異質な個人のケース

この節では、個人の効用関数が異なる場合について分析する。このため、2 タイプ (A タイプと B タイプ) の個人を考える。A タイプの個人の効用関数は $U_A(q_A)$ で表され、B タイプの個人の効用関数は $U_B(q_B)$ で表されるものとする。ただし、 $U_A' > 0$ 、 $U_A'' < 0$ 、 $U_B' > 0$ 、 $U_B'' < 0$ と仮定する。A タイプの個人の人数は n_A 、B タイプの個人の人数は n_B であり、 $n_A + n_B = N$ とする。最適な自動車利用者数を n^* とし、以下では、分析に意味を持たせるために、A タイプの個人の自動車利用による社会的期待便益が B タイプの個人より大きく³、最適な生産量 n^* が $n_A < n^* < N$ となるケースに限定して議論する。(2)~(4)式から最適化条件は下記のようなになる⁴。

$$\frac{\partial U_A(q_A^*)}{\partial q_A} = 2Dp(x^*)MF_A(q_A^*, q_B^*) \quad (19)$$

$$\frac{\partial U_B(q_B^*)}{\partial q_B} = 2Dp(x^*)MF_B(q_A^*, q_B^*) \quad (20)$$

³ 次式を仮定する。 $U_A(q_A) - 2p(x)D\{n_A f(q_A, q_A) + (n - n_A)f(q_A, q_B)\} > U_B(q_B) - 2p(x)D\{n_A f(q_A, q_B) + (n - n_A)f(q_B, q_B)\}$

⁴ 導出の詳細は、Appendix (2)を参照

$$U_B(q_B^*) = \frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial n} + 2p(x^*)F_B(q_B^*, q_A^*)D \quad (21)$$

$$\frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial x} = n_A\{-p'(x^*)F_A(q_A^*, q_B^*)D\} + (n^* - n_A)\{-p'(x^*)F_B(q_B^*, q_A^*)D\} \quad (22)$$

ここで、

$$F_A(q_A^*, q_B^*) = n_A f(q_A^*, q_A^*) + (n^* - n_A) f(q_B^*, q_A^*)$$

$$F_B(q_B^*, q_A^*) = n_A f(q_B^*, q_A^*) + (n^* - n_A) f(q_B^*, q_B^*)$$

$$MF_A(q_A^*, q_B^*) = \frac{\partial F_A(q_A^*, q_B^*)}{\partial q_A} = n_A f_1(q_A^*, q_A^*) + (n^* - n_A) f_1(q_A^*, q_B^*)$$

$$MF_B(q_A^*, q_B^*) = \frac{\partial F_B(q_A^*, q_B^*)}{\partial q_B} = n_A f_1(q_B^*, q_A^*) + (n^* - n_A) f_1(q_B^*, q_B^*)$$

であり、 F_A 、 F_B はそれぞれタイプ A あるいはタイプ B の個人が他のすべての自動車と遭遇する頻度を表し、Appendix (2) に説明するように、 MF_A や MF_B は、それぞれタイプ A あるいは B の各個人が利用頻度を増加させた場合の、他のすべての自動車との限界遭遇頻度を表している。このことから、(19) 式及び (20) 式の右辺は各タイプの個人の自動車利用に関する社会的限界被害額を表している。(22) 式右辺は、安全性能を引き上げることによって自動車利用者全員の期待事故被害額の減少の総計（安全性能に関する社会的限界便益）を表している。

なお、Shavell(2020)においては、特殊ケースとして、 $f(q_i, q_j) = q_i q_j$ の関数を用いて議論している。この関数型のように、 $f_{11} = f_{22} = 0$ の条件を満たすような関数の場合、Appendix (1) で説明したように、市場均衡において、タイプ A とタイプ B の限界効用の均等化が最適化条件となる。しかし、一般には、 $f_{11} = f_{22} = 0$ が成立する保証はないため、限界効用均等化は最適化条件とならない。

以下で説明するように、市場均衡と最適化条件を比較することで、(命題 2) が得られる。

(命題 2)

異なる効用関数をもつ個人のケースに拡張すると、ファーストベストを達成するためには、Shavell ルールに加え、(命題 1) の (11)、(12) 式と同様の式に従って政策を実施する必要がある。ただし、 $t_{R\&D}^*$ と t^* は、下記のように修正される。

$$t_{R\&D}^* = -Dp'(x^*)[n^*F_B(q_B^*, q_A^*) - n_A\{F_A(q_A^*, q_B^*) - F_B(q_B^*, q_A^*)\}] \quad (23)$$

$$t^* = \frac{t_{R\&D}^*}{n^*} \quad (24)$$

上式から、 $n^*F_B(q_B^*, q_A^*) - n_A\{F_A(q_A^*, q_B^*) - F_B(q_B^*, q_A^*)\} > 0$ なら、命題 1 と同様、自動車購入あるいは技術開発に対する課税が必要となるが、もし $n^*F_B(q_B^*, q_A^*) - n_A\{F_A(q_A^*, q_B^*) - F_B(q_B^*, q_A^*)\} < 0$ なら、自動車購入あるいは技術開発に対する補助金が必要となる。

(証明)

(13)式から、(19)式と同様に、タイプ A の個人及びタイプ B の個人の期待利益最大化条件は次式で表すことができる。

$$\frac{\partial U_A(q_A^L)}{\partial q_A} = 2Dp(x)MF_A(q_A^L, q_B^L) \quad (25)$$

$$\frac{\partial U_B(q_B^L)}{\partial q_B} = 2Dp(x)MF_B(q_A^L, q_B^L) \quad (26)$$

タイプ A と B の自動車に対する需要価格はそれぞれ

$$WTP_A(x) = U(q_A^L) - 2Dp(x)F_A(q_A^L, q_B^L) - TAX(x)$$

$$WTP_B(x) = U(q_B^L) - 2Dp(x)F_B(q_B^L, q_A^L) - TAX(x)$$

となり、脚注 3 の仮定から、市場の需要価格 $P(x)$ は次式で決定される。

$$P(x) = \min(WTP_A(x), WTP_B(x)) = U(q_B^L) - 2Dp(x)F_B(q_B^L, q_A^L) - TAX(x) \quad (27)$$

企業の利潤関数は、 $\pi = P(x)n - TC(n, x) - TAX_{R\&D}(x)$ と書き直すことができるので、最大化条件を考慮すると、以下の市場均衡条件が得られる。

$$U(q_B^L) - 2Dp(x^L)F_B(q_B^L, q_A^L) - TAX(x^L) = \frac{\partial TC(n^L, x^L)}{\partial n} \quad (28)$$

$$\frac{\partial TC(n^L, x^L)}{\partial x} = -2Dp'(x^L)F_B(q_B^L, q_A^L)n^L - n^L \frac{\partial TAX(x^L)}{\partial x} - \frac{\partial TAX_{R\&D}(x^L)}{\partial x} \quad (29)$$

上記の (25)、(26)、(28)、(29) 式と (19) ~ (22) 式と比較から、ファーストベストを達成するための $TAX(x)$ 、 $TAX_{R\&D}(x)$ の条件は下記の 2 つの条件となる。

$$TAX(x^*) = 0 \quad (30)$$

$$n^* \frac{\partial TAX(x^*)}{\partial x} + \frac{\partial TAX_{R\&D}(x^*)}{\partial x} = -Dp'(x^*)[n^*F_B(q_B^*, q_A^*) - n_A\{F_A(q_A^*, q_B^*) - F_B(q_B^*, q_A^*)\}] \quad (31)$$

(30)～(31)を満たす TAX^* 及び $TAX_{R\&D}^*$ は、命題のとおりとなる。

(証明終)

なお、(22)式右辺は、 x の社会的限界便益（期待被害総額の減少） SMB を表しており下記の式ように、タイプ A の個人全員に生じる限界便益（右辺第 1 項）とタイプ B の個人全員に生じる限界便益（右辺第 2 項）に分解できる。

$$SMB = n_A MB_A + (n^* - n_A) MB_B$$

ただし、 $MB_A = -Dp'(x^*)n_A F_A(q_A^*, q_B^*)$ 、 $MB_B = -Dp'(x^*)F_B(q_B^*, q_A^*)$ であり、 MB_A は安全性能を引き上げることによってタイプ A の個人の生じる限界便益（期待被害額の減少）、 MB_B はタイプ B の個人に生じる限界便益を表している。

一方、Shavell ルールによって、生産者に生じる x の限界開発利益 MB は (29) 式の右辺第 1 項で表されている。これは、 $n^* \times 2 \times MB_B$ であり、市場の需要価格の上昇 ($2 \times MB_B$) による収入増加を表している。この結果、(31) 式は下記のように書き直すことができる。

$$n^* \frac{\partial TAX(x^*)}{\partial x} + \frac{\partial TAX_{R\&D}(x^*)}{\partial x} = n^* MB_B - n_A (MB_A - MB_B) \quad (32)$$

上式の右辺は、Shavell ルールの下で企業に生じる安全性能の限界開発利益と社会的限界便益の差を表している。特に、右辺の第 1 項は、Shavell ルール下において、自動車利用者が発生する期待被害額の 2 倍の費用負担をするために、高い安全性能に対する自動車価格の上昇を通じて自動車生産者に発生する過剰な研究開発インセンティブの部分を表している（これを Shavell 効果と呼ぼう）。右辺第 2 項は、以下で説明するように、開発利益の生産者への還流を弱める効果、条件によっては開発利益の生産者への還流を強める効果を表している（スピルオーバー効果と呼ぶ）。

$n_A \neq 0$ ⁵ のとき、すなわち、個人が異なる効用関数をもつ場合、(命題 1) の条件は、 $-n_A\{MB_A - MB_B\}$ だけ修正される必要があることを示している。

⁵ $n_A = 0$ のとき、効用関数が同一の場合と合致し、(32) 式右辺は $n^* MB_B$ となり、Shavell ルールによって、 $n^* MB_B$ だけ過大に技術開発のインセンティブが与えられてしまうため、(命題 1) で示す通り、 TAX や $TAX_{R\&D}$ を用いることで、最適な技術開発に誘導

このとき、 $q_A^* > q_B^*$ であれば、 $MB_A > MB_B$ となるため、(32)式右辺は n^*MB_B より小さくなる。このため、効用関数が同一の場合と比べて、技術開発に対する過剰インセンティブは小さくなり、課税額を低める必要があることを示している。特に、 q_A^* と q_B^* の差が大きいほど、また、自動車利用者に占める A タイプの個人の比率が大きいほど、 $n_A\{MB_A - MB_B\}$ が大きくなるため、(32) 式の右辺が負になる場合もある。このような場合には、むしろ課税ではなく、補助金が望ましいことを示している。

$q_A^* > q_B^*$ のときにこのような状況が生じるのは、タイプ B から生じる企業の限界開発利益 (MB_B 、価格上昇による収入増の効果) とタイプ A から生じる社会的限界便益 (MB_A) との間に差があり、後者の効果が前者の効果を上回るため、技術開発の社会的利益の一部が企業に帰属しないために生じる (スピルオーバー効果)。

一方、 $q_A^* < q_B^*$ であれば、 $MB_A < MB_B$ となり、(32) 式の第 2 項は正となるため、TAX あるいは TAX_{R&D}は課税となる必要があることを示している。ただし、このとき(32)式右辺は n^*MB_B より大きくなるため、効用関数が同一の場合以上に、Shavell ルールは過大な技術開発のインセンティブ与える。このため、課税額をより高く設定する必要がある。これは、 $q_A^* > q_B^*$ のケースとは逆に、安全性能の向上によって、タイプ A に生じる社会的限界便益 (MB_A) が自動車価格の上昇 (=タイプ B に生じる社会的限界便益 (MB_B)) より小さいため、社会的限界便益を越える利益が、自動車価格の上昇を通じて生産者に還流するからである。このため、さらに強い技術開発インセンティブが生産者に与えられることとなる。

なお、Appendix(3)に示すように、 $U'_A(q_A^*) > U'_B(q_A^*)$ ならば、 $q_A^* > q_B^*$ 、 $U'_A(q_A^*) < U'_B(q_A^*)$ ならば、 $q_A^* < q_B^*$ となる。

第 6 節 損害保険が利用可能な場合の最適政策：効用関数が異なる場合

損害賠償制度の下では、事故の費用負担 (L) のリスクを回避するために自動車利用者は損害保険に加入するかもしれない。この節では、フェアプレミアムによって決定される保険契約を考え、保険の導入によって、第 5 節の結論がどのように変わるかを検討しよう。

以下では、保険会社が被保険者 (自動車利用者) の自動車利用頻度を観察できない場合の保険と観察できる場合の保険の 2 つのケースに分けて考える。

個々人の自動車利用頻度を観察できない場合、保険料 $\rho(x)$ が期待負担額の平均値に等しい水準に設定されるものとする⁶。このとき、当初、A タイプ及び B タイプの自動車利用者全員が保険を購入するとすると、 $\rho(x)$ は次式のように表される。ただし、 n^I 、 q_A^I 、 q_B^I は市場均衡において実現される自動車利用者の数、A タイプ及び B タイプの個人の自動車利用頻度を表している。

する必要があることを示している。効用関数が同一の場合には、スピルオーバー効果が 0 となるため、常に課税が望ましくなる。

⁶ 保険会社は、個々人の q_A^I や q_B^I は観察できなくても、全体の交通量 ($n_A F_A(q_A^I, q_B^I) + (n^I - n_A) F_B(q_A^I, q_B^I)$)、あるいは、一人当たりの事故件数 ($\frac{n_A F_A(q_A^I, q_B^I) + (n^I - n_A) F_B(q_A^I, q_B^I)}{n^I}$) の情報が入手できれば、保険料を設定できる。

$$\rho(x) = \frac{2Dp(x)\{n_A F_A(q_A^I, q_B^I) + (n^I - n_A)F_B(q_A^I, q_B^I)\}}{n^I}$$

このとき、 $q_A > q_B$ であれば、次式が成立し、A タイプの個人は、保険料の方が自分で費用負担するより費用負担が小さく、B タイプの個人は、保険料の方が自分で費用負担するより費用負担が大きくなる。

$$2p(x)F_A(q_A^I, q_B^I)D > \rho(x) > 2p(x)F_B(q_A^I, q_B^I)D$$

このため、この個人がリスク中立的であるとすると、A タイプの個人は保険を購入するが、B タイプの個人は購入しない⁷。保険を購入しない B タイプの個人は、(25)式に示すように、自動車利用を抑制するインセンティブを持つが、A タイプの個人は、そのようなインセンティブをもたない。このような場合、保険を買わない人だけに限定して、自動車利用税を課すことができれば、ファーストベストに誘導できるが、そのような選択的な税の導入が困難であれば、保険の導入によってファーストベストを達成するのが困難になる。

一方、個々人の自動車利用頻度を観察できる場合⁸には、次式で表されるように、個々人及び保険会社にとってフェアプレミアムになる保険料 $I(q_i, x^I)$ を設定することが可能になる。ただし、 C_i は個人 i が購入する補償額である。

$$I(q_i, x^I) = C_i p(x^I) \{n_A f(q_i, q_A^I) + (n^I - n_A) f(q_i, q_B^I)\}$$

ただし、 x^I 、 n^I 、 q_i 、 q_A^I 、 q_B^I はそれぞれ損害保険が存在する際の安全性能、自動車利用者数、タイプ i の個人の自動車利用量、タイプ i 以外の個人の自動車利用量（タイプ A 及びタイプ B）を表している。フェアプレミアムであれば、期待効用最大化の結果、各個人は発生する費用負担に等しい額の補償を購入することが知られている。したがって、安全性能や自動車利用頻度に関わらず、各個人の補償額は、 $C_i = 2D$ となる。この結果、各個人の自動車利用に関する効用最大化条件と需要価格に関する条件式は、(25)、(26)式と同一になるため、保険のないケースと同一の政策が最適な政策となる。

以上から、次の命題 3 が得られる。

(命題 3)

各個人の自動車利用頻度が観察できない場合、フェアプレミアムな保険契約においては、自動車利用頻度の少ない個人は保険を購入せず、利用頻度の多い個人のみが保険を購入す

⁷ $q_A < q_B$ であれば、逆のことが起こる。

⁸ 自動車に設置されているオドメーターを利用することにより、一定期間の走行距離を把握することができ、近年、自動車走行距離を考慮した保険商品が販売されており、技術的には、被保険者の自動車利用距離（自動車利用頻度の代理変数）を考慮した保険契約は可能になっている。

る。この結果、保険を購入した個人の自動車利用頻度は過大となるため、保険購入者のみに選択的に自動車利用税を課すことができなければ、ファーストベストは達成できない。

各個人の自動車利用頻度が観察できる場合、各個人及び保険会社にとってフェアプレミアムな保険が供給された場合、各個人は、事故によって発生する自分の負担額（2D）に等しい補償を購入するため、保険の存在しないケースと同じ政策が最適な政策となり、ファーストベストが達成できる。

第7節 製造物責任制度による解決

本節では、製造物責任制度の下における最適政策を検討しよう。以下では、第5節と同様に、AタイプとBタイプの2タイプの異なる効用関数をもつ個人が存在するケースを考える。このとき、安全性能 x の自動車を使用する場合、タイプ i ($i=A, B$) の個人の期待便益 B_i は次式の通りになる。ただし、 $t(q_i, x)$ は安全性能が x のときタイプ i の個人の自動車利用頻度に応じて課される自動車利用税、 $TAX(x)$ は自動車購入税を表している。ただし、 i はタイプ A か B のいずれかである。

$$B_i = U_i(q_i) - t(q_i, x) - TAX(x) \quad (33)$$

一方、自動車市場は完全競争市場であり、安全性能 x の自動車を生産する代表的な自動車生産企業の期待利潤関数 π は、次式で表される。

$$\pi = P(x)n - TC(n, x) - p(x)D[n_A F_A(q_A, q_B) + (n - n_A)F_B(q_B, q_A)] - TAX_{R\&D}(x) \quad (34)$$

ただし、 $P(x)$ は安全性能 x の自動車の市場価格である。以下では、事故が起きた場合、製造物責任によって、企業が事故の被害額を補償するケースを考えているため、上式右辺第三項に示すように、期待被害額を考慮している。このとき、次の命題4が得られる。

(命題4)

異なる効用関数をもつ個人のケースについて、製造物責任制度によって、事故の被害が救済される場合、最適な資源配分を実現する自動車利用税 $t(q_i, x)$ 、自動車購入税 $TAX(x)$ 及び技術開発税 $TAX_{R\&D}(x)$ は、次式のようになる。

$$t(q_i, x^*) = 2Dp(x^*)\{n_A f(q_i, q_A^*) + (n^* - n_A)f(q_i, q_B^*)\}$$

$$TAX(x) = -t(q_B^*, x)$$

$$TAX_{R\&D}(x) = 0$$

(証明)

(33)式より、 i ($i=A, B$) タイプの個人の便益最大化条件が次式で表される。

$$\frac{\partial U_i(q_i^c)}{\partial q_i} = \frac{\partial t(q_i^c, x^c)}{\partial q_i} \quad (35)$$

ただし、 q_i^c 、 x^c は、それぞれ市場均衡における i タイプの個人の自動車利用量、自動車の安全性能を表している。また、需要価格は次式で決定される。

$$P(x^c) = \min [U_A(q_A^c) - t_A(x^c)q_A^c + SUB(x^c), U_B(q_B^c) - t_B(x^c)q_B^c - TAX(x^c)]$$

利潤最大化条件及び市場均衡条件から次式が得られる⁹。

$$\begin{aligned} U_B(q_B^c) - t(q_B^c, x^c) + SUB(x^c) \\ = \frac{\partial TC(n^c, x^c)}{\partial n} + 2Dp(x^c)[n_A f(q_B^c, q_A^c) + (n^c - n_A)f(q_B^c, q_B^c)] \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial TC(n^c, x^c)}{\partial x} = - \left\{ \frac{\partial t(q_B^c, x^c)}{\partial x} + \frac{\partial TAX(x^c)}{\partial x} \right\} n^c - Dp'(x^c)[n_A F_A(q_A^c, q_B^c) + (n^c - n_A)F_B(q_B^c, q_A^c)] \\ - \frac{\partial TAX_{R\&D}(x^c)}{\partial x} \end{aligned} \quad (37)$$

ただし、 n^c は市場均衡における自動車利用人数を表している。

製造物責任制度を採用するとき、(35)～(37)式と(19)～(22)式を比較して、最適な $t(q_i, x^*)$ 、 $SUB(x)$ 、 $TAX_{R\&D}(x)$ の条件を考えると、ファーストベストを達成するために満たすべき条件は下記の 3 つの条件である。

$$t(q_i, x^*) = 2Dp(x^*)\{n_A f(q_i, q_A^*) + (n^* - n_A)f(q_i, q_B^*)\}$$

$$TAX_B(x) = -t(q_B^*, x)$$

$$\frac{\partial TAX_{R\&D}(x)}{\partial x} = 0$$

以上から、命題 4 が得られる。

(証明終)

命題 4 は、以下のようなインプリケーションをもっている。

(1) 製造物責任の場合、事故の被害額は自動車生産者がすべて負担するために、生産の限界費用を増加させる。このため、企業は、より高い安全性能の自動車を開発することで、被害額の費用負担を減らすインセンティブをもつ。このとき、Shavell ルールのように、

⁹ 脚注 3 の仮定より、最適政策の下では、 $P(x^c) = U_B(q_B^c) - t(q_B^c, x^c) - TAX(x^c)$ となる。

過大な事故被害額を負担していないため、技術開発に対して、補助金や課税をする必要はない。

(2) 自動車利用者は事故の費用を一切負担しないため、自動車利用によって生じる事故の被害額を内部化するために、自動車利用に応じて課す自動車利用税が必要となる。このとき、自動車利用税は、自分自身の自動車利用によって生じる社会的期待被害に等しい水準に設定する必要がある。このため、 $q_A^* \geq q_B^*$ ならば、 $t(q_A^*, x^*) \geq t(q_B^*, x^*)$ となり、 $q_A^* < q_B^*$ ならば、 $t(q_A^*, x^*) < t(q_B^*, x^*)$ となる。

(3) 各個人にとっては、自動車生産者を通じて、間接的に事故被害額を負担しているため、自動車利用税の負担は、自動車購入に際して過大となる。このため、その負担を相殺するために、タイプ B の個人が負担する自動車利用税と同額の自動車購入補助金が必要となる。

第 8 節 おわりに

現在、AI などを活用した自動車の自動運転技術の開発が進められている。本稿では、損害賠償制度あるいは製造物責任制度の下において、自動車の安全性能や自動車利用を最適な水準に誘導するために、どのような政策を補完することが社会的に望ましいかを明らかにした。本稿で得られた結論を要約すると以下の通りである。

第一に、損害賠償制度によって解決する場合、Shavell(2020)は、通常の厳格責任ルールでは、最適な安全性能が選択されず、Shavell ルールを実施する必要があることを明らかにしていたが、安全性能の技術開発のインセンティブを考慮した場合、Shavell ルールだけでは、ファーストベストの実現は困難であり、追加的な政策の組み合わせが必要である。具体的には、個々人の効用関数が同一であるケースにおいては、安全性能に応じた自動車購入税あるいは技術開発税の導入が必要であり、個々人の効用関数が異なるケースにおいては、自動車購入補助金や技術開発補助金の実施が必要なケースが存在する。Shavell ルールの下では、自動車利用者が、事故の社会的期待費用（被害額）の 2 倍の費用を負担する。このため、生産者が性能を引き上げることによって生じる個々人の期待便益の増加は、社会的な限界便益の 2 倍となり、過大な開発利益が生産者に還流し、過大な技術開発のインセンティブを与える（Shavell 効果）。一方、個々人の効用関数が異なる場合、スピルオーバー効果が存在するため、自動車生産者の開発意欲を弱めるメカニズムも存在する。このため、Shavell 効果よりスピルオーバー効果が大きい場合には、補助金が望ましくなる。

第二に、個々人の効用関数が異なる場合において、損害賠償制度下で、損害保険が活用可能な場合、個々人の自動車利用量が観察できないケースでは、保険購入者のみを対象に、選択的に自動車利用税を課すことができないと、ファーストベストを達成できない。これは、自動車利用量に応じた保険契約を結ぶことができない場合、自動車利用量の多い個人のみが保険を購入し、少ない個人は保険を購入しない。保険を購入しない個人は、事故の費用を自分で負担するため、自動車利用を抑制するインセンティブをもつが、保険を購入する個人はそのようなインセンティブがない。そのため、保険購入者に自動車利用を抑制するためには、自動車利用税を課すことが必要となる。しかし、このような選択的な課税を社会が受容しない場合には、損害保険の存在によって、ファーストベストを実現で

きなくなる。一方、個々人の自動車利用量が観察できる場合には、個々人及び保険会社にとってフェアプレミアムとなるような保険契約が提示されれば、全員が保険を購入する。この保険の下では、個々人が自動車利用を抑制するインセンティブをもつため、損害保険が存在しない場合と同じ政策によってファーストベストを実現できる。

第三に、製造物責任制度を活用して問題を解決する場合には、自動車利用税と自動車購入補助金の導入が必要であり、技術開発に対する課税や補助金は必要ない。

以上の議論から、損害保険が存在する場合、もし個人の自動車利用頻度に応じたフェアプレミアムの保険契約が難しい場合には、損賠賠償制度の活用によってファーストベストを実現できないため、製造物責任制度を活用し、車検時などに自動車利用税を課しつつ、自動車購入補助金を与えることが望ましい。しかし、もし個人の自動車利用頻度の応じたフェアプレミアムの保険契約が可能であれば、損害賠償制度と製造物責任制度のいずれを活用してもファーストベストを達成できる。ただし、自動車の安全性能に関して、自動車生産者と自動車利用者の間は何らかの情報の非対称性が存在する可能性がある場合（自動車生産者の方がより正確な情報をもっている場合）や自動車利用者に安全性能に関する理解力が欠如するようなケースでは、安全性能が正しく認識されないため、製造物責任制度を活用した制度設計の方が望ましいかもしれない。

今回提案している制度設計は、Shavell ルールのように自動車利用によって生じる外部費用を負担させるような政策を導入した場合、最適な技術開発を実現するためには、技術開発に対する課税あるいは補助金が追加的に必要となることを示している。現在、完全自動運転自動車の開発のために政府による支援が行われているが、この政策は、完全自動運転技術の開発に焦点を当て、事故の原因となる自動車利用頻度を抑制するという視点をもっていない。Shavell ルールのように、自動車利用による外部費用を負担せずすむと、自動車利用頻度は増加する。また、事故を起こしたときの費用負担が小さくて済むため、安全性能技術に対する需要（あるいは、支払意思額）が小さくなり、低い安全性能しか実現しないかもしれない。このようなケースでは、セカンドベスト政策として、高い安全性能を実現するための政府の支援が必要となる。ただし、一定以上の安全性能を実現しようとする、技術開発が容易ではなく、より高い安全性能を実現するための追加的費用が大きくなる。このとき、安全性能を高めるかわりに、自動車利用頻度を減らすことで事故を抑制する方が社会に発生する費用をより小さくできる。このため、安全性能だけに着目するのではなく、自動車利用頻度なども含めて総合的な観点から政策を立案することが社会的に望ましい。

Appendix (1) 通常自動車と完全自動運転車が混在するケース

以下では、第3節の設定をベースに、完全自動運転自動車のみが利用される社会になるまでの移行期間において、すなわち、現在私たちが利用している通常の自動車（以下では、普通自動車と呼ぶ）と完全自動運転自動車が混在する社会において、Shavellルールを使いつつ、ファーストベストを実現するための政策について分析する。

いま、簡単化のために、市場では、通常の自動車と完全自動運転自動車の2種類の自動車が販売されているものとしよう。個人 j が普通自動車を運転する場合、事故確率は個人 j の注意水準 y_j によって影響を受けるものとする。以下では、簡単化のために普通自動車の安全性能は明示的に扱わない。このとき、この個人が、他の普通自動車と遭遇した場合の事故確率は $p^{yy}(y_j, y_{-j})$ 、完全自動運転自動車と遭遇した場合の事故確率は $p^{yx}(y_j, x)$ 、完全自動運転自動車同士が遭遇した場合の事故確率は $p^x(x)$ で表されるものとしよう。

n^0 人の個人が存在し、この個人は、通常の自動車と完全自動運転自動車のいずれかを購入するか、自動車を購入しないという意思決定をするものとする。普通自動車を購入する個人の数 n_A 、完全自動運転自動車を購入する個人の数 n_B とし、 $n_A + n_B < n^0$ であると仮定する。普通自動車を使用する個人 h ($0 \leq h \leq n_A$) が自分以外の自動車に遭遇する頻度 F_h^A は、

$$F_h^A = \int_0^{n_A} f(q_h^A, q_j^A) dj + \int_0^{n_B} f(q_h^A, q_j^B) dj$$

と表され、安全性能 x をもつ完全自動運転自動車を使用する個人 i ($0 \leq i \leq n_B$) が自分以外の自動車に遭遇する頻度 F_i^B は、

$$F_i^B = \int_0^{n_A} f(q_i^B, q_j^A) dj + \int_0^{n_B} f(q_i^B, q_j^B) dj$$

と表される。このとき、 q_h^A 、 q_i^B はそれぞれ普通自動車を保有する個人 h の自動車利用量、完全自動運転自動車を保有する個人 i の自動車利用量を表している。各個人が事故に遭遇した場合に自分に生じる被害額は D とし、個人間で同一であると仮定すると、普通自動車を利用する個人 h に生じる期待事故被害額 TD_h^A および完全自動運転自動車を利用する個人 i に生じる期待事故被害額 TD_i^B はそれぞれ以下のように表される。

$$TD_h^A = D \left\{ \int_0^{n_A} p^{yy}(y_h, y_j) f(q_h^A, q_j^A) dj + p^{yx}(y_h, x) \int_0^{n_B} f(q_h^A, q_j^B) dj \right\}$$

$$TD_i^B = D \left\{ \int_0^{n_A} p^{yx}(y_j, x) f(q_i^B, q_j^A) dj + p^x(x) \int_0^{n_B} f(q_i^B, q_j^B) dj \right\}$$

一方、競争的な代表企業が普通自動車を生産する際の費用関数は $TC^A(n_A)$ 、安全性能 x の完全自動運転自動車を生産する際の費用関数は $TC^B(n_B, x)$ であり、下記の性質をもつ費用関数を仮定する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial TC^A}{\partial n_A} = TC_n^A > 0, \frac{\partial^2 TC^A}{\partial n_A^2} = TC_{nn}^A > 0, \frac{\partial TC^B}{\partial n_B} = TC_n^B > 0, \frac{\partial^2 TC^B}{\partial n_B^2} = TC_{nn}^B > 0, \frac{\partial TC}{\partial x} = TC_x^B > 0, \frac{\partial^2 TC}{\partial n_B \partial x} \\ = TC_{nx}^B > 0 \end{aligned}$$

さらに、普通自動車を利用する個人 j の注意（事故回避行動）費用は $y_i q_A^j$ と仮定する。以上から、安全性能 x の自動車が生産されるときに社会厚生 SW は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} SW = & \int_0^{n_A} U(q_h^A) dh + \int_0^{n_B} U(q_i^B) di - \int_0^{n_A} y_h q_h^A dh - TC^A(n_A) - TC^B(n_B, x) \\ & - D \int_0^{n_A} \left\{ \int_0^{n_A} p^{yy}(y_h, y_j) f(q_h^A, q_j^A) dj + p^{yx}(y_h, x) \int_0^{n_B} f(q_h^A, q_j^B) dj \right\} dh \\ & - D \int_0^{n_B} \left\{ \int_0^{n_A} p^{yx}(y_j, x) f(q_i^B, q_j^A) dj + p^x(x) \int_0^{n_B} f(q_i^B, q_j^B) dj \right\} di \end{aligned}$$

このとき、 $q_i^A = q^A$ 、 $q_i^B = q^B$ 、 $y_i = y_j = y$ であることを考慮すると、社会厚生最大化条件は下記の式で表すことができる。

$$\frac{\partial U(q^{A*})}{\partial q^A} = y^* + 2D\{p^{yy}(y^*, y^*)n_A^* f_1(q^{A*}, q^{A*}) + p^{yx}(y^*, x^*)n_B^* f_1(q^{A*}, q^{B*})\} \quad (A1)$$

$$\frac{\partial U(q^{B*})}{\partial q^B} = 2D\{p^{yx}(y^*, x^*)n_A^* f_1(q^{B*}, q^{A*}) + p^x(x^*)n_B^* f_1(q^{B*}, q^{B*})\} \quad (A2)$$

$$q^{A*} = -2D\{p_1^{yy}(y^*, y^*)n_A^* f(q^{A*}, q^{A*}) + p_y^{yx}(y^*, x^*)n_B^* f(q^{A*}, q^{B*})\} \quad (A3)$$

$$TC_x^B = -Dn_B^*\{2p_x^{yx}(y^*, x^*)n_A^* f(q^{A*}, q^{B*}) + p_x^x(x^*)n_B^* f(q^{B*}, q^{B*})\} \quad (A4)$$

$$U(q^{A*}) = y^* q^{A*} + TC_n^A + 2D\{p^{yy}(y^*, y^*)n_A^* f(q^{A*}, q^{A*}) + p^{yx}(y^*, x^*)n_B^* f(q^{A*}, q^{B*})\} \quad (A5)$$

$$U(q^{B*}) = TC_n^B + 2D\{p^{yx}(y^*, x^*)n_A^* f(q^{A*}, q^{B*}) + p^x(x^*)n_B^* f(q^{B*}, q^{B*})\} \quad (A6)$$

ただし、変数に付された*は、最適化条件を満たす解であることを示している。

いま、Shavell ルール下において、普通自動車購入税 TAX^A 、完全自動運転自動車購入税 $TAX^B(x)$ が実施されており、 $TAX^B(x)$ については自動車安全性能に応じて課税される

ものとする。このとき、普通自動車を利用する個人の期待便益 B^A 及び完全自動運転自動車を利用する個人の期待便益 B^B は、それぞれ次式のように書くことができる。

$$B^A = U(q^A) - yq^A - 2D\{p^{yy}(y, y)n_{Af}(q^A, q^A) + p^{yx}(y, x)n_{Bf}(q^A, q^B)\} - TAX^A$$

$$B^B = U(q^B) - 2D\{n_A p^{yx}(x, y)f(q^B, q^A) + p^x(x)n_{Bf}(q^B, q^B)\} - TAX^B(x)$$

期待便益最大化条件は、下記の通りになる。

$$U'(q_0^A) = y_0 + 2D\{p^{yy}(y_0, y_0)n_{Af_1}(q_0^A, q_0^A) + p^{yx}(y_0, x)n_{Bf_1}(q_0^A, q_0^B)\} \quad (A7)$$

$$q_0^A = -2D\{p^{yy}_1(y_0, y_0)n_{Af}(q_0^A, q_0^A) + p^{yx}_1(y_0, x)n_{Bf}(q_0^A, q_0^B)\} \quad (A8)$$

$$U'(q_0^B) = 2D\{p^{yx}(x, y_0)n_{Af_1}(q_0^B, q_0^A) + p^x(x)n_{Bf_1}(q_0^B, q_0^B)\} \quad (A9)$$

ただし、各変数の下付き数字の 0 は、期待便益最大化条件を満たす解であることを意味している。このとき、安全性能が x である自動車に対する個人 i の支払い意思額を $WTP_k(x)$ は次式のように表される。

$$WTP_A = U(q_0^A) - y_0 q_0^A - 2D\{p^{yy}(y_0, y_0)n_{Af}(q_0^A, q_0^A) + p^{yx}(y_0, x)n_{Bf}(q_0^A, q_0^B)\} - TAX^A$$

$$WTP_B(x) = U(q_0^B) - 2D\{p^{yx}(x, y_0)n_{Af}(q_0^B, q_0^A) + p^x(x)n_{Bf}(q_0^B, q_0^B)\} - TAX^B(x)$$

普通自動車と完全自動運転自動車の需要価格 P_A 、 $P_B(x)$ は、それぞれ、 $P_A = WTP_A$ 、 $P_B(x) = WTP_B(x)$ となる。

一方、自動車市場は完全競争市場であり、普通自動車及び安全性能 x の自動車を生産する代表的な自動車生産企業の利潤関数 π_A 、 π_B は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \pi_A &= P_A n_A - TC^A(n_A) \\ \pi_B &= P_B(x) n_B - TC^B(x)(n_B, x) - TAX_{R\&D}(x) \end{aligned}$$

ただし、 $TAX_{R\&D}(x)$ は開発される安全性能に応じて課される技術開発税である。また、事故によって被害が生じた場合の損害賠償責任は企業には生じず、自動車利用者に生じることを想定している。利潤最大化条件から、以下の条件式が得られる。

$$P_A^0 = TC_n^A(n_A^0)$$

$$P_B^0(x^0) = TC_n^B(n_B^0, x^0)$$

$$\frac{dP_B(x^0)}{dx} n_B^0 = TC_x^B(n_B^0, x^0) + \frac{\partial TAX_{R\&D}(x^0)}{\partial x}$$

ただし、上付き文字の 0 は、各変数が利潤最大化条件を満たす解であることを意味している。以上から、市場均衡条件は、(A7) ~ (A9) 式、及び以下の条件式になる。

$$U(q_0^A) = y_0 q_0^A + TC_n^A(n_A^0) + 2D\{p^{yy}(y_0, y_0)n_A^0 f(q_0^A, q_0^A) + p^{yx}(y_0, x^0)n_B^0 f(q_0^A, q_0^B)\} + TAX^A \quad (A10)$$

$$U(q_0^B) = TC_n^B(n_B^0, x^0) + 2D\{p^{yx}(x^0, y_0)n_A^0 f(q_0^B, q_0^A) + p^x(x^0)n_B^0 f(q_0^B, q_0^B)\} + TAX^B(x^0) \quad (A11)$$

$$-\left\{2D\{p^{yx}(x^0, y_0)n_A^0 f(q_0^B, q_0^A) + p^x(x^0)n_B^0 f(q_0^B, q_0^B)\} + \frac{\partial TAX^B(x^0)}{\partial x}\right\} n_B^0 - \frac{\partial TAX_{R\&D}(x^0)}{\partial x} = TC_x^B(n_B^0, x^0) \quad (A12)$$

最適化条件 ((A1) ~ (A6) 式) と市場均衡条件 ((A7) ~ (A12) 式) の比較から、最適政策の条件は、下記の通りになる。

$$\frac{\partial TAX^B(x^*)}{\partial x} n_B^* + \frac{\partial TAX_{R\&D}(x^*)}{\partial x} = -Dn_B^{*2}\{p_x^x(x^*)f(q^{B*}, q^{B*})\}$$

$$TAX^A = 0$$

$$TAX^B(x^*) = 0$$

以上から、最適政策に関して (命題 A) が得られる。

(命題 A)

損害賠償制度の下でファーストベストを実現するためには、Shavell ルールに加え、技術開発を抑制するインセンティブを与えるために、次式に表すような、安全性能に応じた自動車購入税 $TAX(x)$ または技術開発税 $TAX_{R\&D}(x)$ を導入する必要がある。

$$TAX_{R\&D}(x) = (1 - \alpha)t_{R\&D}^* x$$

$$TAX^B(x) = \alpha t^*(x - x^*)$$

ただし、 $t_{R\&D}^* = -Dn_B^{*2}\{p_x^x(x^*)f(q^{B*}, q^{B*})\}$ 、 $t^* = \frac{t_{R\&D}^*}{n^*}$ であり、 α は任意の値を示すパラメータである。

(証明終)

上記の結果は、普通自動車と混在し、安全性能を引き上げることの便益が普通自動車の利用者にスピルオーバーしたとしても、(命題1)と同様に、R&D課税は完全自動運転自動車の利用者に生じる安全性能の限界便益に等しい水準に課税額を設定する必要があることを示している。

Appendix (2) 異質な個人のケースの最適化条件の導出

効用関数が、Aタイプの個人とBタイプの個人に分けられ、Aタイプの個人の自動車利用による社会的期待便益がBタイプの個人より大きいことを仮定（脚注2）し、最適な生産量 n^* が $n_A < n^* < N$ となるケースに限定して議論すると、 n^* のうち Aタイプの個人は全員 (n_A) 自動車を利用し、Bタイプの個人は、 $n^* - n_A$ だけ自動車を利用し、 $n_B - (n^* - n_A)$ は自動車を利用しない。したがって、(2)~(4)式から最適化条件は下記のように書き直すことができる。

① 最適な自動車利用に関する条件

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_A(q_A^*)}{\partial q_A} &= p(x^*) \left\{ \int_0^{n^*} Df_1(q_A^*, q_j^*) dj + \int_0^{n^*} Df_2(q_j^*, q_A^*) dj \right\} = 2Dp(x^*) \int_0^{n^*} f_1(q_A^*, q_j^*) dj \\ &= 2Dp(x^*) \left\{ \int_0^{n_A} f_1(q_A^*, q_A^*) dj + \int_{n_A}^{n^*} f_1(q_A^*, q_B^*) dj \right\} \\ &= 2Dp(x^*) \{ n_A f_1(q_A^*, q_A^*) + (n^* - n_A) f_1(q_A^*, q_B^*) \} \\ &\quad [\because f_1(q_A^*, q_j^*) = f_2(q_j^*, q_A^*)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_B(q_B^*)}{\partial q_B} &= p(x^*) \left\{ \int_0^{n^*} Df_1(q_B^*, q_j^*) dj + \int_0^{n^*} Df_2(q_j^*, q_B^*) dj \right\} = 2Dp(x^*) \int_0^{n^*} f_1(q_B^*, q_j^*) dj \\ &= 2Dp(x^*) \left\{ \int_0^{n_A} f_1(q_B^*, q_A^*) dj + \int_{n_A}^{n^*} f_1(q_B^*, q_B^*) dj \right\} \\ &= 2Dp(x^*) \{ n_A f_1(q_B^*, q_A^*) + (n^* - n_A) f_1(q_B^*, q_B^*) \} \\ &\quad [\because f_1(q_B^*, q_j^*) = f_2(q_j^*, q_B^*)] \end{aligned}$$

ここで、タイプ A の個人 i が他の自動車と遭遇する頻度の合計を F_A 、タイプ B の個人 i が他の自動車と遭遇する頻度の合計を F_B とすると、

$$F_A(q_A, q_B) = n_A f(q_A, q_A) + (n - n_A) f(q_A, q_B)$$

$$F_B(q_B, q_A) = n_A f(q_B, q_A) + (n - n_A) f(q_B, q_B)$$

したがって、

$$\frac{\partial F_A}{\partial q_A} = MF_A(q_A, q_B) = n_A f_1(q_A, q_A) + (n - n_A) f_1(q_A, q_B)$$

$$\frac{\partial F_B}{\partial q_B} = MF_B(q_B, q_A) = n_A f_1(q_B, q_A) + (n - n_A) f_1(q_B, q_B)$$

である。

なお、Shavell(2020)においては、特殊ケースとして、 $f(q_i, q_j) = q_i q_j$ の関数を用いて議論している。この関数型のように、 $f_{11} = f_{22} = 0$ の条件を満たすような関数の場合、 $f_1(q_A, q_A) = f_1(q_B, q_A)$ 、 $f_1(q_A, q_B) = f_1(q_B, q_B)$ となるため、

$$\frac{\partial F_A}{\partial q_A} = \frac{\partial F_B}{\partial q_B} \equiv MF(q_A, q_B, n) = n_A f_1(q_A, q_A) + (n - n_A) f_1(q_A, q_B)$$

となる。この結果、

$$\frac{\partial U_A(q_A^*)}{\partial q_A} = \frac{\partial U_B(q_B^*)}{\partial q_B} = 2Dp(x^*)MF(q_A^*, q_B^*)$$

が成立し、市場均衡において、タイプ A とタイプ B の限界効用の均等化が最適化条件となる。しかし、ここで示すように、一般には、 $f_{11} = f_{22} = 0$ が成立する保証はないため、限界効用均等化は最適化条件とならない。

② 最適な自動車生産に関する条件

脚注 3 の仮定から、(4) 式は下記のように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} U_B(q_B^*) &= \frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial n} + Dp(x^*) \left\{ \int_0^{n^*} f(q_i^*, q_B^*) di + \int_0^{n^*} f(q_B^*, q_j^*) dj \right\} \\ &= \frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial n} + 2Dp(x^*) \int_0^{n^*} f(q_i^*, q_B^*) di \\ &= \frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial n} + 2Dp(x^*) \left\{ \int_0^{n_A} f(q_A^*, q_B^*) di + \int_{n_A}^{n^*} f(q_B^*, q_B^*) di \right\} \\ &= \frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial n} + 2Dp(x^*) F_A \{ n_A f(q_A^*, q_B^*) + (n^* - n_A) f(q_B^*, q_B^*) \} \\ &\quad [\because f(q_i^*, q_B^*) = f(q_B^*, q_i^*)] \\ \therefore U_B(q_B^*) &= \frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial n} + 2Dp(x^*) F_B(q_B^*, q_A^*) \end{aligned}$$

③ 最適な安全性能選択に関する条件

$$\begin{aligned}
\frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial x} &= -p'(x^*) \int_0^{n^*} \int_0^{n^*} Df(q_i^*, q_j^*) dj di \\
&= -Dp'(x^*) \int_0^{n^*} \left\{ \int_0^{n_A} f(q_A^*, q_j^*) dj + \int_{n_A}^{n^*} f(q_B^*, q_j^*) dj \right\} di \\
&= -Dp'(x^*) \left[\int_0^{n_A} \left\{ \int_0^{n_A} f(q_A^*, q_j^*) dj + \int_{n_A}^{n^*} f(q_A^*, q_j^*) dj \right\} di \right. \\
&\quad \left. + \int_{n_A}^{n^*} \left\{ \int_0^{n_A} f(q_B^*, q_j^*) dj + \int_{n_A}^{n^*} f(q_B^*, q_j^*) dj \right\} di \right] \\
&= -Dp'(x^*) \left[\int_0^{n_A} \left\{ \int_0^{n_A} f(q_A^*, q_A^*) dj + \int_{n_A}^{n^*} f(q_A^*, q_B^*) dj \right\} di \right. \\
&\quad \left. + \int_{n_A}^{n^*} \left\{ \int_0^{n_A} f(q_B^*, q_A^*) dj + \int_{n_A}^{n^*} f(q_B^*, q_B^*) dj \right\} di \right] \\
&= \{-n_A Dp'(x^*) [n_A f(q_A^*, q_A^*) + (n^* - n_A) f(q_B^*, q_A^*)] \\
&\quad - (n^* - n_A) Dp'(x^*) [n_A f(q_B^*, q_A^*) + (n^* - n_A) f(q_B^*, q_B^*)]\}
\end{aligned}$$

$$\therefore \frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial x} = n_A \{-Dp'(x^*) F_A(q_A^*, q_B^*)\} + (n^* - n_A) \{-Dp'(x^*) F_B(q_B^*, q_A^*)\}$$

したがって、上式右辺第1項はタイプAの個人全員(n_A)の限界便益 (x を引き上げることによって生じる期待事故被害額の減少)の合計、第2項はタイプBの個人全員($n^* - n_A$)の限界便益の合計となっている。

以上から、最適化条件は、以下のように表される

$$\frac{\partial U_A(q_A^*)}{\partial q_A} = 2Dp(x^*) MF_A(q_A^*, q_B^*)$$

$$\frac{\partial U_B(q_B^*)}{\partial q_B} = 2Dp(x^*) MF_B(q_A^*, q_B^*)$$

$$U_B(q_B^*) = \frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial n} + 2Dp(x^*) F_B(q_B^*, q_A^*)$$

$$\frac{\partial TC(n^*, x^*)}{\partial x} = n_A \{-p'(x^*) DF_A(q_A^*, q_B^*)\} + (n^* - n_A) \{-p'(x^*) DF_B(q_B^*, q_A^*)\}$$

Appendix (3) $q_A^* > q_B^*$ (あるいはその逆) となる条件の導出

$U_A(q_A)$ 、 $U_B(q_B)$ をテーラー展開を用いて表すと下記の通りになる。

$$U_A(q_A) = U_A(q_A^*) + U'_A(q_A^*)(q_A - q_A^*) + \frac{1}{2}U''_A(q_A^*)(q_A - q_A^*)^2$$

$$U_B(q_B) = U_B(q_A^*) + U'_B(q_A^*)(q_B - q_A^*) + \frac{1}{2}U''_B(q_A^*)(q_B - q_A^*)^2$$

ただし、 $U'_A(q_A^*) > 0$ 、 $U'_B(q_A^*) > 0$ 、 $U''_A(q_A^*) < 0$ 、 $U''_B(q_A^*) < 0$ と仮定する。

(命題 2) を満たす最適政策を実施すると、市場均衡において、最適な自動車利用 q_A^* 、 q_B^* が実現できることから、(24) 式を用いて、

$$U'_A(q_A^*) = U'_B(q_B^*) = U'_B(q_A^*) + U''_B(q_A^*)(q_B^* - q_A^*)$$

したがって、

$$q_B^* - q_A^* = -\frac{U'_A(q_A^*) - U'_B(q_A^*)}{U''_B(q_A^*)}$$

ここで、 $U''_B(q_A^*) < 0$ であるから、 $U'_A(q_A^*) > U'_B(q_A^*)$ ならば、 $q_A^* > q_B^*$ 、 $U'_A(q_A^*) < U'_B(q_A^*)$ ならば、 $q_A^* < q_B^*$ となる。

参考文献

Balkenborg, D. (2001) “How liable should a lender be? The case of judgement-proof firms and environmental risk: Comment”, *American Economic Review*, 91, 731-738

Beard, T. R. (1990) “Bankruptcy and care choice”, *Rand Journal of Economics*, 21, 626-634

Brown, J.P. (1973) “Toward an economic theory of liability”, *J. Legal Stud.*, 2 (2), 323–349.

Calfee, J. and R. Craswell (1984) “Some effects of uncertainty on compliance with legal standards”, *Virginia Law Review*, 70, 965-1003

De Chiara, A., I. Elizalde, E. Manna and A. Segura-Moreiras (2021) “Car accidents in the age of robots”, *International Review of Law and Economics*, 68, 106022.

Emons, W. and J. Sobel (1991) “On the effectiveness of liability rules when agents are not identical”, *Review of Economic Studies*, 58, 375-390

Hiriart, Y. and D. Martimort (2006) “The benefit of extended liability”, *Rand Journal of Economics*, 37, 562-582

Hutchison, E. and K. van't Veld (2005) “Extended liability for environmental accidents: what you see is what you get”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 49, 157-173

Pitchford, R. (1995) “How liable should a lender be? The case of judgement-proof firms and environmental risk”, *American Economic Review*, 85, 1171-1186

Shavell, S. (1980) “Strict liability versus negligence”, *Journal of Legal Studies*, 9 (1), 1–25.

Shavell, S. (1986) “The judgement proof problem”, *International Review of Law and Economics*, 6, 45-58

Shavell, S. (2007a) *Economic analysis of accident law*, Harvard Press, 310+

Shavell, S. (2007b) “Chapter 2 Liability for Accidents” , in *Handbook of Law and Economics*, Volume 1, edited by A. M. Polinsky and S. Shavell, Elsevier, 139–182

Shavell, S. (2020) “On the redesign of accident liability for the world of autonomous vehicles”, *Journal of Legal Studies*, 49 (2), 243–285.14