

投稿論文



# IoT 車両情報の速度に関するモニタリング選択問題

栗野盛光<sup>1</sup>・高原 勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 一般会員 Ph.D. in Economics 筑波大学准教授 社会工学域 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

<sup>2</sup> 一般会員 筑波大学客員教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

本研究では、自動車の走行状態を遠隔地から動的に記録観察可能な IoT 車両情報において、特に走行速度と規制速度に関わる問題を扱う。現在の制度において、走行速度は、政府（警察）の取り締まりにより部分的に観察され、規制速度を超えている場合に政府はドライバーに罰金を科す。本研究では、走行速度が政府（警察）により動的に常時観察可能でありかつ記録されているという完全モニタリングを考え、ドライバーには部分モニタリングと完全モニタリングの選択が可能である状況を考える。そして、ドライバーの完全モニタリングと規制速度走行を誘導するような政府による報酬・罰金を検討する。最適報酬・罰金体系では、規制速度走行ではドライバーに報酬、実勢速度走行では部分モニタリング時の罰金よりも低い罰金にできることを示す。

**Key Words:** *driving speed, monitoring, incentives, rewards, punishments*

## 1. はじめに

これからの自動車の技術革新と社会に与える影響は急速な変化と進展を迎えようとしている。その筆頭にある技術革新が自動運転といえる。自動運転とは高度運転支援から始まり、認知、判断、操作という運転行為それぞれにおいて、ハンドルやブレーキ、アクセルを自動制御して目的地へと移動することである。自動運転を実現する上で自動車のさまざまなセンサーから通信により得られる IoT 車両情報の活用が実現できる段階に来ている。IoT とは、Internet of Things の略であり、総務省「平成 27 年版情報通信白書」によれば、「自動車、家電、ロボット、施設などあらゆるモノがインターネットにつながり、情報のやり取りをすることで、モノのデータ化やそれに基づく自動化等が進展し、新たな付加価値を生み出す」ことである。IoT 技術により交換できるような車両情報を、以下より IoT 車両情報と呼

ぶ。代表的な IoT 車両情報として、絶対位置情報、走行速度、走行軌跡、操作情報、燃料残量などがある（高原、2016a, b）。このような社会的計測機能とも言える IoT 車両情報を社会で共有し、利活用することで、より安全・安心、そして効率的な社会を構築することが期待できる。一方で、IoT 車両情報は政府がその開示を常時強制することは困難であろう。しかしながら、各ドライバーがその情報開示に対して同意するならば、そのような困難はなくなる。したがって、情報開示に同意する経済的インセンティブと秘匿性を与えることが、IoT 車両情報の社会的な利活用にとって重要な課題である。

情報を開示するという事は、ドライバーが自分の行動を観察され、モニタリング（観測、監視）されることを意味する。本研究では、自分の行動が完全にモニタリングされることを完全モニタリングと呼び、一部の行動が観察されることを部分モニタリングと呼ぶ。そして、ドライバーが完全モニタリングか部分モニタリングのどちら

かを選ぶことができる時、どの程度の経済的インセンティブを与えれば、ドライバーが完全モニタリングを選択するかという問題を本論文では考える。

ドライバーが自動運転車両で走行する際に、センシングされて記録可能なIoT車両情報は、従来までは運転するドライバー本人のみが把握できるが、常時記録されない情報とでは大きな差異がある。本研究が対象とする情報を明確にするために、まず情報の概念を整理する。

個人情報とは、個人情報の保護に関する法律によると「生存する個人に関する情報であつて、当該情報に含まれる氏名、生年月日その他の記述等により特定の個人を識別できるもの（他の情報と容易に照合することができ、それにより特定の個人の識別することができることとなるものを含む。）をいう。つまり、個人を特定できるような情報が個人情報である。個人情報の特徴としては、個人が同意する時のみ、自分自身の個人情報を第三者に開示することができるという点である。

一方、IoT車両情報を分類する際に、「機密性」と「確認可能性」という概念が有用である。野口(1974)は、**機密性のある情報**を「ある情報を使用しつつ、ゼロの費用で、その内容を秘匿することが可能な場合」と定義し、一方、**確認可能な情報**を「ある情報が（当初所有者の）許可なしに使用された場合、その事実（使用されたという事実、およびその使用者）が、ゼロの費用で探知できる」ような場合と定義している。

IoT車両情報は、走行している最中に発生する情報であり、その時点での情報に意味がある場合が多い。ドライバーは、自らの運転によりこれらの情報を生み出している。

現時点の多くのドライバーにとって典型的な車両環境は次のようなものである。ドライバーには、車両情報は一定の費用で確認可能であるが、過去の情報は自ら記録する必要があり、実際に記録されることは稀である。一方、第三者にとって、これらの情報は、目視あるいは恣意的な機械測定により確認可能であり、ナンバープレート登録や運転免許証により特定できれば個人情報とな

る。しかしながら、第三者が走行している車両の情報を得ることは非常に困難である。したがって、機密性が高い。社会的に望ましくない走行を規制するために、道路毎に規制速度が決められている。規制速度を守ってドライバーが運転しているか否かは、警察が取り締まりにより速度超過したドライバーに罰金を科す。警察による取り締まりは、ドライバーの走行速度という車両走行情報を常にモニタリングすることはできない。このようにドライバーの車両情報が部分的にモニタリングされるような状況を、本研究では部分モニタリングと呼ぶ。

一方、自動運転車両が多く公道を走行する時代の到来は、それぞれの自動車にはレーザ、レーダー、カメラなどの機能が装備され、車両走行情報は、自らの車ばかりでなく近傍を走行している車や遭遇する自動車から動的かつ自動的にIoT車両情報としての把握・記録が技術的には可能になるであろう。さらに、それらの車両走行情報を第三者に開示することも可能となる事態が想定できる。このように自動車の動的な走行情報が第三者に共有され、第三者がモニタリングできるような状況を、完全モニタリングと呼ぶ。完全モニタリング下では、ドライバーが生み出す全ての情報は、ドライバーにも（ドライバーが同意した）第三者にも確認可能であり、機密性はなくなる。言い換えると、車両情報に関して、政府とドライバー間で、部分モニタリングでは情報が非対称であるが、完全モニタリングでは情報が対称になる。したがって、部分モニタリングでは観察不可能であった規制速度を守るような運転に対しても、完全モニタリングではドライバーに経済的インセンティブを与えることが可能になる。

本研究では、IoT車両情報の一部である走行速度に焦点をあてて、道路区間毎に固定的に設定されている規制速度との関係を論じる。図1のように、ドライバーは部分モニタリングか完全モニタリングを選択でき、政府は完全モニタリングが選択されるような経済的インセンティブを与えたいと考えている。本研究では、政府にとって最適な経済的インセンティブを求める。具体的には、規制速度が外生的に与えられており、ドライバーは

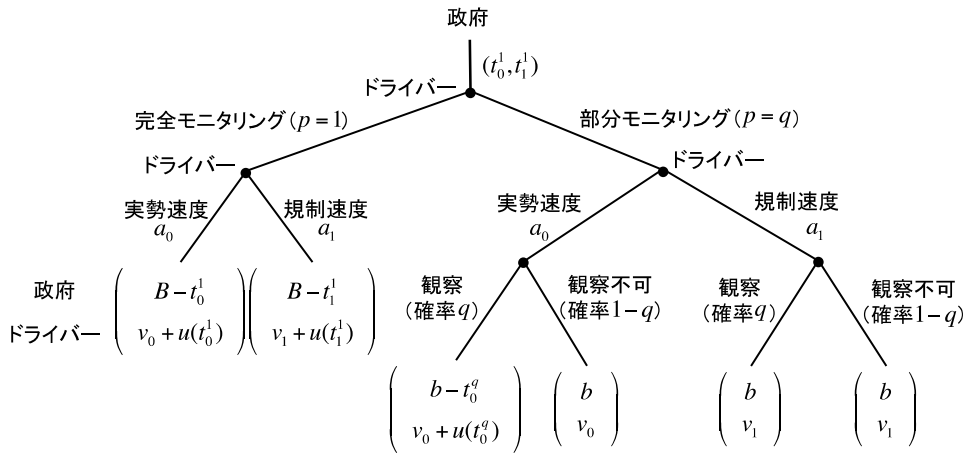


図1 ゲームの木

規制速度か（規制速度を超える）実勢速度のどちらかを選ぶ。また、ドライバーは部分モニタリングか完全モニタリングのいずれかを選ぶことができる。部分モニタリングが選択された場合には、ドライバーの走行速度がある確率で観察され、実勢速度の場合にはドライバーは政府に（外生的に与えられる）罰金を支払い、規制速度の場合にはドライバーと政府との間で金銭的授受は行われな

一方、完全モニタリングが選択された場合には、ドライバーの走行速度が観察され、実勢速度の場合と規制速度の場合に金銭的授受（報酬あるいは罰金）が行われる。本論文では、ドライバーが完全モニタリングを選ぶような金銭的授受（一般に、報酬と呼ぶ）を政府が設計する問題を考える。

一般に、社会的に望ましくない行動に対して規制を設け、規制に反する行動（犯罪とも呼ばれる）に対して罰金を科すことは、Becker (1968) により犯罪の経済学として分析が始まった。本研究が対象とするような車両の規制速度に関しては、部分モニタリングの下での最適な規制速度について、例えば、Lee (1985) や Rodriguez (1990) が分析を行っている。本研究では、規制速度は外生的に与えられていると仮定し、その最適性は議論しない。むしろ、ドライバーの部分モニタリングと完全モニタリングの（内生的）選択という問題をモデル化し、金銭的授受を許容したメカニズムデザインの枠組みの中で分析する。金

銭的授受を許容したメカニズムデザインは、契約の経済学や情報の経済学とも呼ばれ、その文献は膨大であり、例えば、代表的なテキストとして、Laffont and Martimort (2002) や伊藤 (2003) が挙げられる。メカニズムデザインにおいても、著者の知る限り、モニタリング技術の内生的選択をモデル化、分析した論文はない。

## 2. モデル

政府とドライバーという二つの経済主体を考える。ドライバーは、目的地に到着するために自動車を運転する。一方、政府は、負の外部性をしばしば伴う交通事故を考慮し、規制速度を設定する。さらに、政府は、ドライバーの行動を観察し、規制速度を上回った場合は、ドライバーに罰金を科す。本研究では、規制速度は、外生的に与えられていると仮定する。

ドライバーが選択する運轉行動として、2種類のみを考える。一つは、規制速度を超えた高速運轉で、**実勢速度**と呼び、 $a_0$ により表す。もう一つは、規制速度を超えない低速運轉で、**規制速度**と呼び、 $a_1$ により表す。

ドライバーは、実勢速度  $a_0$  で運轉することにより目的地への到着時間が早くなるが、規制速度  $a_1$  では目的地への到着時間が遅くなる。運轉行動  $a_k (k \in \{0, 1\})$  のときの到着時間に起因した効用を  $v_k$  と表す。運轉しないというアウトサイド・

オプションの価値を0と基準化し、 $v_0 > v_1 > 0$ と仮定する。つまり、ドライバーは、運転しないよりも、運転により目的地に行くことを好み、そして到着時間という観点から、実勢速度による走行を規制速度による走行よりも好む。

政府はドライバーの運転行動をモニタリングする。任意の運転行動  $a_k (k \in \{0, 1\})$  に対して、政府が  $a_k$  と観察できる確率を  $p \in [0, 1]$  としてモニタリング技術を表現する。 $p=1$  のとき完全モニタリングと呼び、 $p < 1$  のとき部分モニタリングと呼ぶ。本研究では、分析の簡略化のため、利用可能な部分モニタリング技術は、一つのみで外生的に与えられると仮定し、 $q$  と表す。任意のモニタリング技術を  $p \in \{q, 1\}$  と記述する。

モニタリング技術  $p$  の下で、ドライバーの運転行動  $a_k$  が観察されたとき、政府はドライバーへの金銭移転を行う。この金銭移転を  $t_k^p$  と表す。 $t_k^p \geq 0$  のとき報酬であり、 $t_k^p < 0$  のときは罰金である。一般に  $t_k^p$  を（罰金であっても）報酬と呼ぶ。

現行のモニタリング技術は、部分モニタリングである。部分モニタリング ( $p=q$ ) の下での政府からドライバーの金銭移転を特定化する。ドライバーの行動が観察されない場合は、金銭移転はない。また、規制速度  $a_1$  が観察されたときも金銭移転はない、つまり  $t_1^q = 0$  である。一方、実勢速度  $a_0$  が観察されたときは、ドライバーは罰金を払う、つまり  $t_0^q < 0$  である。本研究では、分析の簡略化のため、部分モニタリングでの報酬 ( $t_0^q, t_1^q$ ) は外生変数であると仮定する。この社会的最適報酬体系については、例えば、Becker (1968) を参照のこと。さらに、報酬 ( $t_0^q, t_1^q$ ) は  $t_0^q < 0, t_1^q = 0$  を満足すると仮定する。

一方、完全モニタリング ( $p=1$ ) 下では、政府はドライバーの行動を完全に観察できるので、実勢速度  $a_0$  に対しても規制速度  $a_1$  にも、それぞれ報酬  $t_0^1$  と  $t_1^1$  を与えることができる。特に、部分モニタリングと異なり、規制速度  $a_1$  に対してドライバーに報酬  $t_1^1$  を与えることができる。

政府のモニタリング技術の（報酬以外の）社会的評価を次のように仮定する。部分モニタリング下の社会的評価は  $b$  であり、完全モニタリング下の社会的評価は  $B$  とする。 $B > b$  とし、 $B$  は  $b$  に

比べ十分に大きいと仮定する。つまり、完全モニタリングの社会的評価は部分モニタリングよりも十分に大きい。完全モニタリング下では、走行速度ばかりでなく、それに伴う位置情報や交通量などが得られ、エネルギーを最小にするような経路選択の誘導、将来の道路投資など都市計画への利用などが期待される。このような側面を社会的評価  $B$  は捉えている。

完全モニタリング技術への移行は、ドライバーの運転行動が動的に常時観察されることになるので、政府は強制的に完全モニタリングを実行することは困難である。よって、本研究では、ドライバーは、運転行動に加えて、モニタリング技術を選択することができる状況を考える。

ドライバーが運転行動  $a_k$  とモニタリング技術  $p$  を選択した時のドライバーの効用を定式化する。運転行動が観察されない場合は、ドライバーの効用は

$$v_k$$

となる。一方、運転行動が観察された場合には、ドライバーの効用を

$$v_k + u(t_k^p)$$

と表現する。ここで、 $u$  は、金銭に対する評価を表す von Neumann and Morgenstern 型効用関数であり、連続関数であり、かつ厳密な増加関数で、 $u(0) = 0$  を満足すると仮定する。つまり、指示関数  $I$  を用いて、行動が観察された場合に  $I=1$ 、観察されなかった場合  $I=0$  と定義すると、ドライバーの効用は、 $v_k + u(t_k^p)I$  と書くことができる。

本研究のゲームの木は図1で表される。まず、政府が完全モニタリングでの運転報酬 ( $t_0^1, t_1^1$ ) を選択し、ドライバーが完全モニタリング  $p=1$  か部分モニタリングを  $p=q$  選択した後に、実勢速度  $a_0$  か規制速度  $a_1$  を選択する。

本研究では、報酬 ( $t_0^q, t_1^q$ ) を用いて部分モニタリングで運営される社会から、完全モニタリングとその下での規制速度運転が選ばれるような社会へ、( $t_0^1, t_1^1$ ) を用いて移行させることが目的であり、そのために政府にとって最適な報酬 ( $t_0^1, t_1^1$ ) を求める。

### 3. 対称情報下での問題

本章では、ドライバーに関わる外生変数  $v_0, v_1$  は、ドライバーと政府の間で共通知識 (common knowledge) と仮定する。つまり、ドライバーの速度に関する効用  $v_0, v_1$  は、ドライバーだけでなく、政府も知っているという対称情報下での分析を行う。非対称情報下での分析は、次章で行う。

部分モニタリングにおいては、外生変数  $t_0^q, v_0, v_1$  の値によって、ドライバーは実勢速度あるいは規制速度を選ぶ。実勢速度  $a_0$  を選ぶ場合の期待効用は  $v_0 + qu(t_0^q)$ 、規制速度  $a_1$  を選ぶ場合の (期待) 効用は  $v_1$  である。したがって、実勢速度を選ぶ場合は、

$$v_0 + qu(t_0^q) \geq v_1 \quad (1a)$$

のときであり、規制速度を選ぶ場合は

$$v_1 \geq v_0 + qu(t_0^q) \quad (1b)$$

のときである。

以下、部分モニタリングで実勢速度あるいは規制速度を選ぶドライバーそれぞれの場合に対して、完全モニタリングと規制速度が選ばれるような報酬体系を分析する。本章では、完全モニタリング下での実勢速度と規制速度の報酬  $(t_0^1, t_1^1)$  を報酬体系と呼ぶ。

#### (1) 部分モニタリングで実勢速度を選ぶドライバー

部分モニタリングで実勢速度を選ぶドライバーを考える。すなわち、式 (1a) が成り立つ。このようなドライバーに対して、完全モニタリング  $p=1$  と規制速度  $a_1$  が選ばれるような報酬体系  $(t_0^1, t_1^1)$  を求める。

まず、ドライバーが完全モニタリングを選択する条件であるモニタリング・インセンティブ条件を導入する。これは、部分モニタリングとその下での行動である実勢速度よりも、完全モニタリングと規制速度を好むことを要求する。すなわち、

$$v_1 + u(t_1^1) \geq v_0 + qu(t_0^1) \quad (2a)$$

である。左辺はドライバーが完全モニタリング  $p=1$  と規制速度  $a_1$  を選ぶ際の効用であり、右辺は部分モニタリング  $p=q$  で実勢速度  $a_0$  を選ぶ際

の期待効用である。

次に、完全モニタリング下で、ドライバーが実勢速度よりも規制速度を選ぶという速度インセンティブ条件を導入する。これは

$$v_1 + u(t_1^1) \geq v_0 + u(t_0^1) \quad (2b)$$

である。左辺はドライバーが規制速度  $a_1$  を選ぶ際の効用であり、右辺はドライバーが実勢速度  $a_0$  を選ぶ際の効用である。

最後の条件は、ドライバーがアウトサイド・オプションを選ぶよりも規制速度  $a_1$  を選ぶ方が少なくとも良いという個人合理性条件である。つまり、

$$v_1 + u(t_1^1) \geq 0 \quad (2c)$$

である。

政府の問題は、3つの条件 (2a)、(2b)、(2c) の下で、利得  $B - t_1^1$  を最大にする報酬体系  $(t_0^1, t_1^1)$  を求めることである。解を最適報酬体系と呼ぶ。すなわち、最適報酬体系とは、完全モニタリングかつ規制速度をドライバーが自発的に選ぶような潜在的な報酬の中で、政府にとって最適な報酬体系のことである。

**補題 1** 最適報酬体系において、 $t_1^1 \geq 0$  であり、個人合理性条件 (2c) は厳密な不等号で成立する。

**証明** 最適報酬体系を  $(t_0^1, t_1^1)$  と表す。式 (1a) と (2a) より、 $u(t_1^1) \geq 0$ 。よって、 $u$  は厳密な増加関数であり、 $u(0) = 0$  であるから、 $t_1^1 \geq 0$  となる。また、 $v_1 > 0$  であるから、 $v_1 + u(t_1^1) > 0$  が成り立つ。(証明終)

**補題 2** 最適報酬体系において、モニタリング・インセンティブ条件 (2a) は等号で成り立つ。

**証明** 補題 1 より、個人合理性条件 (2c) は無視できる。さらに、モニタリング・インセンティブ条件 (2a) が成り立つ任意の  $t_1^1$  に対して、政府の利得  $B - t_1^1$  を変えることなく、速度インセンティブ条件 (2b) が成り立つように、 $t_0^1$  を調整することができる。よって、政府の利得を最大化する最適報酬体系においては、モニタリング・インセンティブ条件 (2a) が等号で成り立つ。(証明終)

定理1 部分モニタリングで実勢速度で運転するドライバーに対する最適報酬体系  $(t_0^1, t_1^1)$  は、

$$t_0^1 \leq u^{-1}(qu(t_0^q)) < 0 \quad (3a)$$

$$t_1^1 = u^{-1}(v_0 - v_1 + qu(t_0^q)) \geq 0 \quad (3b)$$

を満たす。この下で、ドライバーは完全モニタリングと規制速度で運転する。ここで  $u^{-1}$  は  $u$  の逆関数である。特に、完全モニタリングでの実勢速度における（最適報酬としての）罰金  $|t_0^1|$  は、部分モニタリングでの罰金  $|t_0^q|$  よりも小さくできる。

定理1は、部分モニタリングにおいて実勢速度で運転するドライバーは、最適報酬体系の下で完全モニタリングを選び、そして規制速度で運転する。完全モニタリング時の最適報酬は、実勢速度  $a_0$  のとき、規制速度での罰金  $|t_0^q|$  よりも小さくすることができる。一方、規制速度では、罰金でなく報酬を与える必要がある。

証明 最適な  $t_1^1$  は、補題2から明らかである。また、それが非負であることは補題1から得られる。

次に、最適な  $t_0^1$  に関する証明をする。補題2からモニタリング・インセンティブ条件 (2a) が等式で成り立つことと、速度インセンティブ条件 (2b) より、この両式から  $v_1 + u(t_1^1)$  を消去して、 $qu(t_0^q) \geq u(t_0^1)$  を得る。よって、関数  $u$  は厳密な増加関数であるから、式 (3a) の  $t_0^1 \leq u^{-1}(qu(t_0^q))$  を得る。このとき、速度インセンティブ条件 (2b) が成り立つ。政府の問題で、 $t_0^1$  が現れるのは速度インセンティブ条件 (2b) だけであり、政府の利得  $(B - t_1^1)$  に影響を与えない。よって、 $t_0^1$  は、不等式  $t_0^1 \leq u^{-1}(qu(t_0^q))$  を満たす限り、最適になる。また、仮定より  $0 < q < 1$ 、 $t_0^q < 0$ 、 $u(0) = 0$ 、 $u$  は増加関数であるから、 $u(t_0^q) < 0$  となり、 $u(t_0^q) < qu(t_0^q) < 0$  を得る。したがって、 $t_0^q < t_0^1 \leq u^{-1}(qu(t_0^q)) < 0$ 、つまり  $|u^{-1}(qu(t_0^q))| \leq |t_0^1| < |t_0^q|$  となるように最適な  $t_0^1$  を取ることができる。(証明終)

定理1 (3b) より、最適報酬  $t_1^1$  は、 $t_0^q$ 、 $q$  と  $v_0$  それぞれに関して増加関数であり、 $v_1$  に関して減

少関数である。すなわち、

1. 部分モニタリング技術  $q$  の精度が高まれば高まるほど、
  2. 実勢速度の効用  $v_0$  が高ければ高いほど、
  3. 罰金  $|t_0^q|$  の額が低ければ低いほど、
  4. 規制速度の効用  $v_1$  が小さければ小さいほど、
- 完全モニタリングでドライバーが規制速度で走行した場合の報酬  $t_1^1$  は、高くなる。

系1 最適報酬体系を  $(t_0^1, t_1^1)$  とする。政府は、

$$b - qt_0^q \leq B - t_1^1, \text{ つまり}$$

$$b - qt_0^q \leq B - u^{-1}(v_0 - v_1 + qu(t_0^q))$$

のとき、部分モニタリングから、ドライバーに完全モニタリングと規制速度を促すような最適報酬体系を好む。その逆も成り立つ。

系1より、部分モニタリングから完全モニタリングへの移行に関して、政府が移行を好むのは、社会的評価の変化  $B - b$  が十分高い時であることが分かる。一方、ドライバーは、モニタリング・インセンティブ条件から、完全モニタリングへの移行で厚生が高まることは明らかである。

証明 政府の利得は、部分モニタリングで  $b - qt_0^q$  であり、ドライバーが完全モニタリングと規制速度を選んだ下では  $B - t_1^1$  である。よって、系1が得られる。(証明終)

(2) 部分モニタリングで規制速度を選ぶドライバー

次に、部分モニタリングで規制速度を選ぶドライバーの場合を考える。すなわち、式 (1b) が成り立つ。このようなドライバーに対して、完全モニタリング  $p = 1$  と規制速度  $a_1$  が選ばれるような報酬  $(t_0^1, t_1^1)$  を求める。

前節で扱った場合と同様に、報酬体系は、モニタリング・インセンティブ条件、速度インセンティブ条件、個人合理性条件を満たす必要がある。前節での各条件の式が異なるのは、モニタリング・インセンティブ条件だけであるので、それを導入する。

モニタリング・インセンティブ条件は、ドライバーが完全モニタリングを部分モニタリングよ



りも好むという条件である。本研究では、報酬体系により完全モニタリングで規制速度を選ぶ。一方、部分モニタリングでは、本節の仮定、規制速度を選ぶ。したがって、モニタリング・インセンティブ条件は

$$v_1 + u(t_1^1) \geq v_1 \quad (4)$$

となる。左辺はドライバーが完全モニタリング  $p=1$  と規制速度  $a_1$  を選ぶ際の効用であり、右辺は部分モニタリング  $p=q$  で規制速度  $a_1$  を選ぶ際の効用である。

政府の問題は、3つの条件(4)、(2b)、(2c)の下で、利得  $B - t_1^1$  を最大にする報酬体系  $(t_0^1, t_1^1)$  を求めることである。ここでも解を最適報酬体系と呼ぶ。

**補題3**  $t_1^1 \geq 0$  ならば、モニタリング・インセンティブ条件(4a)が成立する。

**証明**  $u$  が増加関数であるから、明らかである。(証明終)

**補題4** 最適報酬体系において、 $t_1^1 \geq 0$  であり、個人合理性条件(2c)は厳密な不等号で成立する。

**証明** 最適報酬を  $(t_0^1, t_1^1)$  と表す。モニタリング・インセンティブ条件(4)より、 $u(t_1^1) \geq 0$ 。よって、 $u$  は厳密な増加関数であり、 $u(0) = 0$  であるから、 $t_1^1 \geq 0$  となる。また、 $v_1 > 0$  であるから、 $v_1 + u(t_1^1) > 0$  が成り立つ。(証明終)

**定理2** 部分モニタリングで規制速度で運転するドライバーに対する最適報酬体系  $(t_0^1, t_1^1)$  は、

$$t_0^1 \leq u^{-1}(v_1 - v_0) < 0 \quad (5a)$$

$$t_1^1 = 0 \quad (5b)$$

を満たす。この下で、ドライバーは完全モニタリングと規制速度を選ぶ。ここで  $u^{-1}$  は  $u$  の逆関数である。特に、完全モニタリングでの実勢速度における(最適報酬としての)罰金  $|t_0^1|$  は、部分モニタリングでの罰金  $|t_0^q|$  よりも小さくできる。

定理2は、部分モニタリングにおいて規制速度で運転するドライバーは、最適報酬の下で完全

モニタリングを選び、そして規制速度で運転をする。完全モニタリング時の最適報酬は、実勢速度  $a_0$  のとき、規制速度での罰金  $|t_0^q|$  よりも小さくすることができる。一方、規制速度での報酬はゼロである。

**証明** まず、式(5b)を示す。補題4より、個人合理性条件(2c)は無視できる。また、補題4より、最適報酬  $t_1^1$  の候補は0である。よって、 $t_1^1 = 0$  のとき、補題3より、モニタリング・インセンティブ条件(4)は成り立つから、速度インセンティブ条件(2b)が成り立つような  $t_0^1$  が存在することを示せばよい。

$$\begin{aligned} v_1 + u(t_1^1) &= v_1 \quad (\because t_1^1 = 0, u(0) = 0) \\ &\geq v_0 + qu(t_0^q) \quad (\because (1b)) \\ &> v_0 + u(t_0^q) \quad (\because u(t_0^q) < 0, 0 < q < 1) \end{aligned}$$

上記で、 $u(t_0^q) < 0$  は、 $t_0^q < 0, u(0) = 0$  と  $u$  が増加関数であることによる。したがって、 $t_0^1 = t_0^q$  のとき、速度インセンティブ条件(2b)が成り立つ。したがって、最適報酬では  $t_1^1 = 0$ 、つまり式(5b)が成り立つ。

次に、式(5a)、つまり最適な  $t_0^1$  に関する証明をする。政府の問題で、 $t_0^1$  が現れるのは速度インセンティブ条件(2b)だけであり、政府の利得  $(B - t_1^1)$  に影響を与えない。よって、先ほど示した最適報酬  $t_1^1 = 0$  を速度インセンティブ条件(2b)に代入して、 $v_1 \geq v_0 + u(t_0^1)$  が成り立つ。よって、 $t_0^1 \leq u^{-1}(v_1 - v_0)$  を満たす  $t_0^1$  が最適となる。

また、式(1b)、 $u(t_0^q) < 0, 0 < q < 1$  であるから、 $u(t_0^q) < qu(t_0^q) \leq v_1 - v_0$  を得る。よって、 $t_0^q < t_0^1 \leq u^{-1}(v_1 - v_0)$ 、つまり  $|u^{-1}(v_1 - v_0)| \leq |t_0^1| < |t_0^q|$  となるように最適な  $t_0^1$  を取ることができる。(証明終)

**系2** 最適報酬体系を  $(t_0^1, t_1^1)$  とする。政府は、 $b - qt_0^q \leq B$  のとき、部分モニタリングから、ドライバーに完全モニタリングと規制速度を促すような最適報酬体系を好む。その逆も成り立つ。

一方、前節と同様に、ドライバーは、モニタリング・インセンティブ条件から、完全モニタリングへの移行で厚生が高まることは明らかである。

証明 政府の利得は、部分モニタリングで  $b - qt_0^g$  であり、ドライバーが完全モニタリングと規制速度を選んだ下では  $B - t_1^1 = B$  である (定理2より)。よって、系2が得られる。(証明終)

#### 4. 非対称情報下での問題

前章では、ドライバーの速度に関する効用  $v_0$ ,  $v_1$  は、ドライバーだけでなく、政府も知っているという対称情報下での問題を扱った。本章では、実勢速度に関わる効用  $v_0$  は、ドライバーは知っているが、政府は確率的にしか分からないという非対称情報下での問題を定式化し、分析を行う。分析の簡略化のため、規制速度に関わる効用  $v_1$  は、引き続き共通知識であると仮定する。

ドライバーには、2つのタイプがある。実勢速度に関わる効用  $v_0$  が、 $v_{0H}$  で高いタイプ (高タイプと呼ぶ)、そして  $v_{0L}$  で低いタイプ (低タイプと呼ぶ) である。タイプは私的情報であり、ドライバーは自分のタイプを知っている。一方、政府は、ドライバーがどのタイプであるか確率的にしか分からない。つまり、政府は、確率  $\alpha$  でドライバーは高タイプ、確率  $1 - \alpha$  でドライバーは低タイプであることを知っている。このモデルでは、一人のドライバーが2つのタイプになり得ることを考えているが、複数のドライバーが存在して、高タイプの割合が  $\alpha$ 、低タイプの割合が  $1 - \alpha$  と解釈することも可能である。ここで、 $0 < \alpha < 1$  と仮定し、

$$v_{0L} < v_{0H}, \quad (6a)$$

$$v_1 \leq v_{0H} + qu(t_0^g), \quad (6b)$$

$$v_{0L} + qu(t_0^g) \leq v_1, \quad (6c)$$

とする。すなわち、部分モニタリング下において、式 (6b) より高タイプは実勢速度を選び、式 (6c) より低タイプは規制速度を選ぶと仮定する。

報酬体系  $(t_0^1, t_1^1)$  は、タイプ別に設定することにより、政府は利得を増やすことも可能かもしれない。よって、高タイプへの報酬を  $(t_{0H}^1, t_{1H}^1)$ 、低タイプへの報酬を  $(t_{0L}^1, t_{1L}^1)$  と表す。

ドライバーのそれぞれのタイプが完全モニタリング  $p=1$  と規制速度  $a_1$  を選ぶような報酬体系

$\{(t_{0H}^1, t_{1H}^1), (t_{0L}^1, t_{1L}^1)\}$  を求める。

まず、報酬体系が満たすタイプ・インセンティブ条件を導入する。これは、完全モニタリング  $p=1$  の下で、各運転行動  $a_k$  に対してそれぞれのタイプが自分のタイプを偽って報告しないことを要求する。まず、規制速度  $a_0$  に対して、

$$v_{0L} + u(t_{0L}^1) \geq v_{0L} + u(t_{0H}^1) \quad (7a)$$

$$v_{0H} + u(t_{0H}^1) \geq v_{0H} + u(t_{0L}^1) \quad (7b)$$

となる。式 (7a) は低タイプ、式 (7b) は高タイプである。一方、実勢速度  $a_1$  に対して、

$$v_1 + u(t_{1L}^1) \geq v_1 + u(t_{1H}^1) \quad (7c)$$

$$v_1 + u(t_{1H}^1) \geq v_1 + u(t_{1L}^1) \quad (7d)$$

となる。式 (7c) は低タイプ、式 (7d) は高タイプである。

次に、完全モニタリングが選択される条件であるモニタリング・インセンティブ条件を導入する。これは、各タイプが、部分モニタリングとその運転行動よりも、完全モニタリングと規制速度を選択する条件である。まず、低タイプに対して、

$$v_1 + u(t_{1L}^1) \geq v_1 \quad (8a)$$

となる。式 (6c) より、低タイプは部分モニタリングでは規制速度を選ぶので上のようになる。また、高タイプに対して、

$$v_1 + u(t_{1H}^1) \geq v_{0H} + qu(t_0^g) \quad (8b)$$

となる。式 (6b) より、高タイプは部分モニタリングで実勢速度を選ぶので上のようになる。

さらに、完全モニタリング下で、各タイプが実勢速度よりも規制速度を選ぶという速度インセンティブ条件を導入する。低タイプに対して、

$$v_1 + u(t_{1L}^1) \geq v_{0L} + u(t_{0L}^1) \quad (9a)$$

となる。そして、高タイプに対して、

$$v_1 + u(t_{1H}^1) \geq v_{0H} + u(t_{0H}^1) \quad (9b)$$

となる。

最後に、各タイプが完全モニタリングを選択した下でアウトサイド・オプションよりも規制速度を選ぶという個人合理性を導入する。低タイプに対して、

$$v_1 + u(t_{1L}^1) \geq 0 \quad (10a)$$

となり、高タイプに対して、

$$v_1 + u(t_{1H}^1) \geq 0 \quad (10b)$$

となる。

ドライバーが完全モニタリングと規制速度を

選択したときの政府の利得は

$$\alpha(B - t_{IH}^1) + (1 - \alpha)(B - t_{IL}^1) \quad (11)$$

となる。

政府の問題は、タイプ・インセンティブ条件 (7a) – (7d)、モニタリング・インセンティブ条件 (8a) – (8b)、速度インセンティブ条件 (9a) – (9b)、個人合理性条件 (10a) – (10b) を制約として、式 (11) で表される利得を最大にするような報酬体系  $\{(t_{0H}^1, t_{1H}^1), (t_{0L}^1, t_{1L}^1)\}$  を求めることである。解を最適報酬体系と呼ぶ。すなわち、最適報酬体系とは、完全モニタリングかつ規制速度を全てのタイプが自発的に選ぶような潜在的な報酬の中で、政府にとって最適な報酬体系のことである。

**補題 5** 最適報酬体系では、 $t_{0L}^1 = t_{0H}^1$ 、 $t_{1L}^1 = t_{1H}^1$  が成り立つ。

補題 5 は、政府は報酬体系を通じて各タイプを識別できないことを示しており、タイプ・インセンティブ条件 (7a) – (7d) から容易に証明できる。

補題 5 を用いて、 $t_0^1 := t_{0L}^1 = t_{0H}^1$ 、 $t_1^1 := t_{1L}^1 = t_{1H}^1$  と表し、報酬  $(t_0^1, t_1^1)$  を報酬体系と呼ぶ。よって、政府の問題を次のように簡略化できる。

- 目的関数： $B - t_1^1$
- モニタリング・インセンティブ条件：
  - $v_1 + u(t_1^1) \geq v_1 \quad (8a')$
  - $v_1 + u(t_1^1) \geq v_{0H} + qu(t_0^q) \quad (8b')$
- 速度インセンティブ条件：
  - $v_1 + u(t_1^1) \geq v_{0L} + u(t_0^1) \quad (9a')$
  - $v_1 + u(t_1^1) \geq v_{0H} + u(t_0^1) \quad (9b')$
- 個人合理性条件：
  - $v_1 + u(t_1^1) \geq 0 \quad (10')$

最適報酬体系を求めるのに有用な補題を証明しよう。

**補題 6** 式 (8b') ならば、式 (8a') が成り立つ。また、式 (9b') ならば、式 (9a') が成り立つ。

**証明** 前半の主張は、式 (6b) と式 (8b') より明らかである。後半の主張は、式 (6a) と式 (9b')

より明らかである。(証明終)

補題 6 により、非対称情報下での問題は、モニタリング・インセンティブ条件は式 (8b') だけ、速度インセンティブ条件は式 (9b') だけ考えれば良い。したがって、非対称情報下での問題は、3つの条件 (8b')、(9b')、(10') の下で、利得  $B - t_1^1$  を最大にする報酬体系  $(t_0^1, t_1^1)$  を求めることである。よって、この問題は、 $v_{0H} = v$  として、ドライバーが部分モニタリングで実勢速度を選ぶような対称情報下の問題 (3.1 節) と同じになる。したがって、次の結果を得る。

**定理 3** 非対称情報下での最適報酬体系  $(t_0^1, t_1^1)$  は、

$$t_0^1 \leq u^{-1}(qu(t_0^q)) < 0, \\ t_1^1 = u^{-1}(v_{0H} - v_1 + qu(t_0^q)) \geq 0$$

を満たす。この下で、全てのタイプのドライバーは完全モニタリングと規制速度で運転する。ここで  $u^{-1}$  は  $u$  の逆関数である。特に、完全モニタリングでの実勢速度における (最適報酬としての) 罰金  $|t_0^q|$  は、部分モニタリングでの罰金  $|t_0^q|$  よりも小さくできる。

したがって、定理 1 と定理 3 より、非対称情報下での最適報酬体系は、対称情報下での高タイプと政府が既知のときの最適報酬体系と同じになることが分かる。つまり、政府は、低タイプを無視し、高タイプ (部分モニタリング下で実勢速度で走行するタイプ) だけに直面していると想定して良いことが分かる。

**系 3** 最適報酬体系を  $(t_0^1, t_1^1)$  とする。政府は、

$$b - \alpha qt_0^q \leq B - t_1^1, \text{ つまり} \\ b - \alpha qt_0^q \leq B - u^{-1}(v_{0H} - v_1 + qu(t_0^q))$$

のとき、部分モニタリングから、ドライバー完全モニタリングと規制速度を促すような最適報酬体系を好む。その逆も成り立つ。

系 3 より、部分モニタリングから完全モニタリングへの移行に関して、政府が移行を好むのは、社会的評価の変化  $B - b$  が十分高い時であること

が分かる。一方、ドライバーの全てのタイプは、モニタリング・インセンティブ条件から、完全モニタリングへの移行で厚生が高まることは明らかである。

**証明** 政府の利得は、部分モニタリングの時、

$$\alpha(b - qt_0^q) + (1 - \alpha)b = b - \alpha qt_0^q$$

であり、一方、全タイプが完全モニタリングと規制速度を選んだ時は、 $B - t_1^q$ である。よって、系3が得られる。(証明終)

本章の分析は、タイプ数が2つに限られていた。任意の有限数に一般化し、最も高いタイプ(最も実勢速度の効用の高いタイプ)のインセンティブ条件のだけを考慮すれば良いということは、本章の結果からほぼ自明である。したがって、この一般化は省略する。

## 5. おわりに

本論文では、現行の部分モニタリングだけでなく、ドライバーに完全モニタリングという選択肢が与えられている下で、政府がドライバーの完全モニタリング選択を誘導するような報酬体系を求めた。その結果、定理3で示したように、完全モニタリング下での規制速度には報酬をドライバーに与え、実勢速度には罰金を科すことで、政府のそのような試みは達成できることを明示した。

一方で、本研究では、部分モニタリングから完全モニタリングへの移行に関する社会的便益( $B - b$ )は十分に大きいと仮定した。香月ら(2016)、Wadud et al (2016)は、自動運転車が個人行動や社会に与える影響を推計分析しているが、自動運転に伴うIoT車両情報とモニタリング技術移行の社会的便益の大きさについては、今後、理論的・実証的検討が必要である。

また、本論文では、規制速度や2種類のモニタリング技術は外生的に与えられていた。モニタリング技術のコストを考慮し、Becker(1968)の枠組みで社会的厚生を最大化する報酬とモニタリングレベルの組み合わせの分析も重要な理論的課題であるが、将来の課題としたい。さらに、今後

のIoT車両を保有する自動運転車両の社会実装、浸透の実現性を鑑みると、道路交通システムの制御方式やそれに関わる社会システムから内生的に規制速度や報酬・罰金の可変性を有することが予見される。本論文で検討した動的なIoT車両情報による規制速度や実勢速度との関係はその具体的な先行研究であり、動的な交通流と安全性を担保した道路毎の動的な規制速度の可変性検討や将来の隊列走行時の全慣性量を考慮した信号制御などさまざまな応用が提起され始めている(高原、2016)。これらは今後の課題にしたい。安全、安心、効率的な社会にするための社会的計測機能を果たすIoT車両情報の利活用に関する研究の社会的意義は大きい。本論文ではその利活用に際しての社会応用のあり方を明示できたと言えよう。本論文が導入した走行速度違反に関する理論的枠組みは、実勢速度を道路区間における違法な駐車、規制速度を自発的な駐車取り止めと解釈することで、駐車違反にも適用可能である。

**謝辞**：京都大学経済学研究科の千葉早織講師から文献の紹介を頂き、筑波大学社会学域の大澤義明教授、安東弘泰助教、阿武秀和特別研究員、そして2名の査読者から有益なコメントを頂いた。本研究は、トヨタ自動車(株)と筑波大学との共同研究「次世代社会システムとモビリティのあり方」の一環として行われた。記して感謝する。

## 参考文献

- 1) Becker, G. S.: Crime and punishment: An economic approach, *Journal of Political Economy*, Vol.76, No.2, pp.169-217, 1968.
- 2) Laffont, J.-J. and D. Martimort, *The theory of incentives*, Princeton University Press, 2002.
- 3) Lee, D. R.: Policing cost, evasion cost, and the optimal speed limit, *Southern Economic Journal*, pp.34-45, 1985.
- 4) Rodriguez, R. J.: Penalty schedules and the optimal speed limit, *Eastern Economic Journal*, Vol.XVI, No.1, pp.59-64, 1990.
- 5) Wadud, Z., MacKenzie, D., and Leiby, P.: Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles, *Transportation Research Part A*, Vol.86, pp.1-18, 2016.
- 6) 伊藤秀史：契約の経済理論，有斐閣，2003

- 7) 香月秀仁, 川本雅之, 栗野盛光, 谷口守: 自動運転車 (SDC) の利用による個人の外出行動への影響分析 — 外出頻度・目的地の変化に着目して —, 交通工学研究発表会論文報告集, 2016 (近刊).
- 8) 総務省: 平成 27 年版情報通信白書, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/h27.html>, 2015.
- 9) 高原勇: IoT 車両情報の社会応用に向けて, 内閣府 システム基盤技術検討会 (第 3 回) 議事録, 2016a.
- 10) 高原勇: IoT 車両情報の社会応用に向けて, オペレーションズリサーチ, 61 (9), 2016b (近刊).
- 11) 野口悠紀雄: 情報の経済理論, 東洋経済新報社, 1974. (2016.05.07 受付)  
(2016.07.27 受理)

## Drivers' selection problem between technologies monitoring actual driving speeds

Morimitsu KURINO and Isamu TAKAHARA

This paper deals with informational problems regarding the real driving speeds chosen by drivers. Currently, driving speeds are partially observed by police crackdowns, which we call the partial monitoring, and then a penalty is imposed on drivers exceeding the speed limit. We consider the perfect monitoring in which the driving speed is always observed by the police. A driver is given a choice between partial monitoring and perfect monitoring, and can then choose the speed. We show that in an optimal reward/punishment scheme, the police can induce a driver to select the perfect monitoring and to drive at the speed limit. In particular, the optimal reward should be given to those driving at the speed limit under the perfect monitoring, and the optimal punishment can be smaller than that under the partial monitoring.

