

モビリティイノベーションとマーケットデザイン

栗野 盛光, 高原 勇, 大澤 義明

Society5.0 は、情報通信技術によりサイバー空間とフィジカル空間を融合し、社会課題の解決と経済成長の両立を目指す社会像として提案された概念である。その Society5.0 は社会のさまざまな側面にわたるが、本稿ではモビリティイノベーションによるデータ活用の社会制度を検討する。この制度は、フィジカル空間でのモビリティ情報をサイバー空間で蓄積し、情報を分析してフィジカル空間へフィードバックする。情報が開示されるか否かが制度には重要であり、本稿では通信でつながる車両の走行情報を IoT 車両情報と定義して、ドライバーが自ら情報開示するインセンティブを紹介する。

キーワード：モビリティイノベーション, マーケットデザイン, Society5.0, 情報開示, モニタリングシステム

1. マーケットデザイン

マーケットデザインという分野は、ミクロ経済学の比較的新しい分野であり、数理経済モデルを用いて市場（マーケット）を設計（デザイン）・実践することを目的としている。ここで、市場とは、非常に広い意味で使っている。価格に基づいた取引の場である伝統的な市場ばかりでなく、価格がなく金銭授受のない場も含み、財の欲しい者と提供したい者が会おう抽象的な場である。そのような市場での制度・ルールを実際に使うことを意識してデザインするのがマーケットデザインである。この点が伝統的なミクロ経済学やメカニズムデザインと異なる。一方、オペレーションズ・リサーチと異なるのは、人々の行動を扱うので、ルールの設計者が意図したような結果を誘引するようにルールを考える。このことをインセンティブと言う。

言い換えると、マーケットデザインは、市場を効率性、公平性、インセンティブの観点から望ましい制度・ルールを実践的に考えることが特徴である。ちなみに、オペレーションズ・リサーチは、しばしば最適化問題を扱うが、これは上記の効率性に相当し、マーケット

デザインに近い分野であると言える。

2. Society5.0

Society5.0 とは、第 5 期科学技術計画において日本が目指す社会として提唱された概念である。それは、内閣府ホームページ [1] によると、情報通信技術 (ICT) を最大限活用し、サイバー空間 (仮想空間) とフィジカル空間 (現実空間) を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会である。そこでは、フィジカル空間からセンサーと IoT を通じてあらゆる情報が集積 (ビッグデータ) し、人工知能 (AI) がビッグデータを解析し、高付加価値を現実空間にフィードバックすることとなっている [2]。

カメラ、センサー、レーダー、GPS とともにインターネットの急速な進展により、さまざまな社会経済活動の計測が技術的に可能になっている。これまで、たとえばパーソントリップ調査や交通量調査は年にせいぜい 1 回程度であったものが、連続的に人々の交通行動や各地の交通量の計測が技術的には可能となっており、道路行政やドライバーへの運転支援など情報の社会的利活用のインパクトは極めて大きい。Society5.0 が目指すのは、そのような情報を社会的課題解決へ役立てることである。もちろん、個人の同意の必要のない匿名情報だけのビッグデータだけでも社会的には有用であるが、個人の身体的特徴や母語などの情報があれば、身体的・言語的不平等に左右されないきめ細かな社会サービスが可能となるだろう。また、安心・安全な社会を実現するためにも、誰が犯罪を犯したかなどの個人情報情報の活用は有用である。

個人情報情報の社会的有用性は明らかであるが、しばし

くりの もりみつ
慶應義塾大学経済学部
〒 108-8345 東京都港区三田 2-15-45
kurino@econ.keio.ac.jp
たかはら いさむ
筑波大学未来社会工学開発研究センター
〒 305-8575 茨城県つくば市天王台 1-1-1
takahara@sk.tsukuba.ac.jp
おおさわ よしあき
筑波大学システム情報系社会工学部
〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
osawa@sk.tsukuba.ac.jp

ば忘れられるのはインセンティブである。人々が自分しか保有しない情報を報告し、その情報が社会的に活用されることがわかると、自分の都合のよいように誤魔化すかもしれない。情報の活用のルールのことを経済学ではメカニズム [3] と言い、人々が正直に報告するようなメカニズムに関して膨大な文献が蓄積されてきた（たとえば、[4, 5]）。人々が正直に情報を報告するインセンティブを担保するためには、Society5.0 では互酬性が鍵となる。人々は情報を与える代わりに何らかの（金銭的報酬や利用価値など）便益を受け、一方で情報は社会公共のために利活用され社会が便益を受ける。このような便益（報酬）の循環のことを互酬性と呼び、これを社会制度のメカニズムに適用することが肝要である。

3. モビリティイノベーション

自動車は 100 年に一度と言われる大きなイノベーションに直面している。なかでも、自動運転、電動化、シェアリングがその代表格である。それらは自動車だけでなく、道路インフラやエネルギーステーション、さらには都市、まちづくりを含む統合的なイノベーションになっていくであろう。さらに、その社会実装が進む過程では、フィジカル空間での現象、たとえば走行情報、走行時の操作情報などはデジタルデータとしてサイバー空間にストックされ、カイゼンを要することがらが知能化へと循環していくことが大きな特徴であろう。あらゆる現象がデジタルデータによるエビデンススペースで振り返ることができて、効率性はデータ解析からの最適化としてさらに知能化へ発展することになる。この意味でデジタルデータは最適化研究の宝庫となりえる。一方で、データサンプリングの考え方も進展して、いかに最小限のデータから全体把握をするかという研究課題もすでに生まれている。これが必要なのは、国内でも 6000 万台超の登録台数がある自家用乗用車の走行情報のデジタルデータが常時入手できたとしても、その収集・蓄積・解析に要するコストと創出する価値とのバランスが成立することは持続には必須であるからである。そして、データ利活用にあたっての協調領域としてプラットフォームは極めて大きな鍵となる。さらに、プラットフォームにはデータ保管保全のセキュリティが問われる。

モビリティイノベーションを実現するデータ利活用のプラットフォームの原理モデルは現在、さまざまな観点で研究が進められている。昨年 4 月に設置が発表された筑波大学未来社会工学研究開発センターは、こ



図 1 筑波大学未来社会工学研究開発センターと燃料電池自動車（バス）

のような研究を実施する研究機関の一つである。現在、交通流のデータ利活用に向けた研究準備が進められている（図 1）。産業競争力懇談会（COCON）では「地域社会の次世代自動車交通基盤」が 2017 年度から推進テーマとして採択されている¹。モビリティイノベーションの到来を前提に、交通流把握のデジタルデータの収集を試みて、エビデンススペースでの課題発見を行う準備を進めている。研究学園都市である筑波大学とつくば市を具体的なコンセプト検証の候補地として自動車交通基盤としてのモニタリングシステムの設計開発を検討している。具体的な例を挙げれば、筑波大学の学内から近隣の鉄道駅までのバス交通状況を示すバスロケーション情報や近隣地域のタクシー待機車両情報の共有である。さらに、それらの地域内のモビリティ利用情報（位置・乗車状況・到着時間予測などから構成される）、周辺の交通情報、そして地域特定の気象情報などから統合的な交通予測（交通流予測と整流）が次世代の自動車交通基盤として目指す研究開発である。その試みとして、筑波大学内とつくば駅を結ぶバスでは、モビリティ情報・交通流情報・気象情報、そして対象となるバスの停車場ごとの到着時間予測を WEB 提供することを計画している。研究開発の出口は、自動車を始めとするこれからのモビリティの交通事故ゼロと渋滞解消、そして利便性といった人々の移動の自由を担保することである。たとえば、バスの自動運転が社会実装されるにしても、それ以前にも解決したいこと

¹ このテーマに関する 2017 年度最終報告書、2018 年度活動企画書は、産業競争力懇談会のホームページ (<http://www.cocn.jp/report.html>) で利用可能である（2018 年 5 月 21 日閲覧）。

がらは山積している。乗車するバス停に向けたバスの位置情報、乗車状況、バス停での乗車待機状況、目的地への到着時間予測などを遠隔地にあるバスからの走行情報を収集してリアルタイムでサーバーからスマートフォンなどを通して対象のモビリティ情報を共有することで、利用者は自らの移動を成り行きでなく、一定の予測のもとに計画をして行動を選択できる。これらの情報共有による行動が交通流や人流に与える影響をさらにデータ化して解析、交通流の予測データとして知能化へと循環させることを計画している。

ここで挙げた例は研究計画の一例であり、交通流データのサイバー空間での解析からフィジカル空間へのフィードバックによる課題解決やカイゼンの循環を示している。このようなモビリティのIoTとIoS (Internet of Service) は自動運転の社会実装と連動することで普及が加速的に進むであろう。一方で、自動運転の社会実装の到来をあえて定数として捉え、その後の交通基盤や新たな社会サービスの創出を変数とする研究を進める意義は大きい。自動運転の副産物として創出されるデータの利活用を見据えて、交通流の見える化、共有、予測、知能化による交通流カイゼンを実現する次世代自動車交通基盤は未来のモビリティ社会に必須である。人々の自由な移動としての交通事故ゼロ、渋滞解消、利便性の実現と地球環境保全としての省エネルギー (CO₂ 排出量削減) はこれからのモビリティイノベーションとマーケットデザインを目指すべき重要なゴールである。

社会受容性 (アクセプタンス) がデータ利活用に大きな影響を与えることは言うまでもない。モビリティイノベーションによる自由な移動の実現を公平性と効率性とインセンティブの観点から、望ましい制度やルールを考慮して実践することがマーケットデザインである。本稿では、自動運転を視野にいたした走行情報をIoT車両情報と定義する。次節では本稿の主題として、データ利活用の社会実装に必要なモニタリングをマーケットデザインの観点でインセンティブ設計することで、完全モニタリングを可能とする理論を論じる。データの利活用が鍵となる自動運転、電動化、シェアリングなどのモビリティイノベーションの社会実装や発展にマーケットデザインが果たす役割の大きさを示唆している。なお、自動運転の社会実装に向けた取り組みは内閣府で組成された戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の自動走行システムに研究開発計画 [6] に詳細が記載されているので、ぜひ参照いただきたい。

4. IoT 車両情報のモニタリング選択問題

Society5.0 は社会のすべての活動 (マーケット) に関わるものであり、活動の特徴に応じた社会制度を考える必要がある。Society5.0 の前提にあるのは有用な情報を収集できることである。しかしながら、多くの活動は消費者や企業などさまざまな組織によって行われており、自らに不利な情報を隠す可能性がある。匿名情報はこの点は大きな問題にはならないが、より個人に合わせた財やサービスの提供を目指すならば個人情報から自ら提供するインセンティブのある制度が必要である。また、ある活動の個人情報が得られれば、それはその個人の同意を得ずに匿名情報として社会的に利活用可能である。本節では、そのような制度設計の試みとして、筆者らが行った研究 [7] をもとに、自動車のIoT車両情報でも特に車両速度に着目し、ドライバーが車両速度を開示するようなインセンティブとしての報酬体系を議論する。以下に展開するモデルは、文脈は車両速度であるが、政府が人々の行動を規制するようなさまざまな社会問題に適用可能である。

4.1 モデル

自動車でも目的地に早く到着したいドライバーと、規制速度で安全に運転してほしい政府がいる。ドライバーは、実勢速度 a_0 が規制速度 a_1 のどちらかを選ぶ。また、ドライバーは目的地に行かないという選択肢 (アウトサイド・オプション) ももっている。実勢速度で走行すると目的地に早く着くことから、実勢速度で走行する効用 v_0 は規制速度 v_1 で走行するよりも大きい。よって、 $v_0 > v_1$ と仮定する。アウトサイド・オプションから得る効用を基準化してゼロとして、目的地に到着したいドライバーを想定する。つまり、 $v_0 > v_1 > 0$ と仮定する。

現行の環境では、規制速度走行を守ってほしい政府 (警察) は、取締りなどにより、確率 q で部分的にドライバーの車両速度を観察する。これを部分モニタリングと呼ぶ。IoT技術の進展は、観察確率 q を高めることにも寄与することになるが、その極端な場合である観察確率が1のとき、つまり走行速度が常に観察されるという完全モニタリングも可能である。モニタリング技術 p を観察確率で、部分モニタリングを $p = q$ 、完全モニタリングを $p = 1$ と表す。

現行の部分モニタリング ($p = q$) 下では、政府は、ドライバーに規制速度を選んでもらうために、実勢速度走行を観察した際に罰金をドライバーから徴収する。罰金を $t_0^q < 0$ と表し、罰金額は $|t_0^q|$ である。以降、金

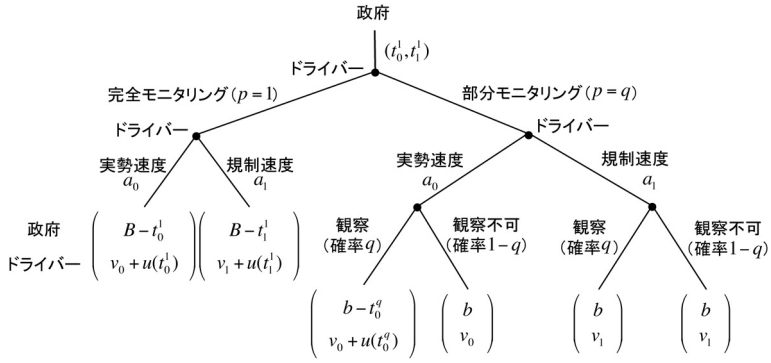


図2 ゲームの木 [7]

銭移転 t_k^p は、上付文字 $p \in \{0, 1\}$ でモニタリング技術を、下付文字で速度 a_k , $k \in \{0, 1\}$, を表す。金銭移転は、報酬の場合に正、罰金の場合に負とする。規制速度で走行していた場合には、ドライバーは罰金を支払う必要はない。つまり、 $t_1^q = 0$ である。一方、完全モニタリング下では、走行速度が完全に観察されるので、実勢速度 a_0 に罰金 t_0^l を課すばかりでなく、規制速度 a_1 に対して報酬 t_1^l を与えることも可能になる。

ドライバーは、走行速度 a_k を選べるだけでなく、自ら情報開示はしない部分モニタリング ($p = q$)、あるいは自ら情報を開示する完全モニタリング ($p = 1$) のどちらかを選べる (図 2)。ドライバーは、政府に走行速度が観察されない場合は効用 v_k を得る一方、観察された場合は効用 $v_k + u(t_k^p)$ を得る。ここで、 u は、金銭評価を表す効用関数で、連続かつ増加関数で、 $u(0) = 0$ を満たす。

一方で、政府は完全モニタリングによりドライバーの情報を得ることで社会的便益 B 、部分モニタリングにより社会的便益 b を得るとする。便益は完全モニタリングのほうが部分モニタリングより大きいとする。

このモデルのゲームの木は図 2 で表される。本稿では、部分モニタリングでの罰金 t_0^q を所与として、政府がドライバーに完全モニタリングと規制速度を選んでもらうようなインセンティブとして、完全モニタリングでの罰金・報酬 (t_0^l, t_1^l) を設計すればよいかという問題を考える。

4.2 分析

ドライバーを、二つのタイプに分けて議論する。一つのタイプは、部分モニタリングで実勢速度を選ぶドライバーで、

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

を満たす。実勢速度走行の効用 v_0 が高いドライバー

が当てはまる。左辺は実勢速度 a_0 を選んだときの期待効用であり、右辺は規制速度 a_1 を選んだときの効用である。二つ目のタイプは、部分モニタリングで規制速度を選ぶドライバーで、上の不等式の逆

$$v_1 \geq v_0 + qu(t_0^q) \quad (2)$$

を満たす。実勢速度の効用 v_0 が低いドライバーが当てはまる。

まず、ドライバーがどちらのタイプか政府が知っているという対称情報下での問題をタイプ別に議論し、最後にタイプが不確実にしかわからないという非対称情報下での問題を議論する。

4.2.1 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 を選ぶような罰金・報酬 (t_0^l, t_1^l) を求めよう。そのためには、次の三つの条件が成立する必要がある。

$$v_1 + u(t_1^l) \geq v_0 + qu(t_0^q) \quad (3)$$

(モニタリング・インセンティブ条件)

$$v_1 + u(t_1^l) \geq v_0 + u(t_0^l) \quad (4)$$

(速度インセンティブ条件)

$$v_1 + u(t_1^l) \geq 0 \quad (5)$$

(個人合理性条件)

モニタリング・インセンティブ条件 (3) は、完全モニタリング・規制速度のほうが部分モニタリング・実勢速度よりも効用が高いことを表す。速度インセンティブ条件 (4) は、完全モニタリング下で規制速度のほうが実勢速度よりも効用が高いことを表す。そして、個人合理性条件 (5) は、完全モニタリング・規制速度のほうがアウトサイド・オプションよりも効用が高いことを表す。

政府の問題は、三つの条件 (3), (4), (5) の下で、利得

$B - t_1^1$ を最大にするように罰金・報酬 (t_0^1, t_1^1) を選ぶことである。そのようなものを最適罰金・報酬と呼ぶ。

定理 1 ([7]). 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罰金・報酬は

$$\begin{aligned} t_0^1 &\leq u^{-1}(qu(t_0^0)) < 0, \\ t_1^1 &= u^{-1}(v_0 - v_1 + qu(t_0^0)) \geq 0 \end{aligned}$$

を満たす。この下で、ドライバーは完全モニタリングで情報を開示し、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走行に対する罰金 $|t_0^1|$ は、部分モニタリングでの罰金 $|t_0^0|$ よりも小さくできる。

4.2.2 部分モニタリングで規制速度を選ぶドライバー

次に、もう一つのタイプ、つまり部分モニタリングで規制速度を選ぶタイプが、完全モニタリング $p = 1$ と規制速度 a_1 を選ぶような罰金・報酬 (t_0^1, t_1^1) を求めよう。そのためには、次の三つの条件が成立する必要がある。

$$\begin{aligned} v_1 + u(t_1^1) &\geq v_1 \\ &\text{(モニタリング・インセンティブ条件)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_1 + u(t_1^1) &\geq v_0 + u(t_0^1) \\ &\text{(速度インセンティブ条件)} \end{aligned} \quad (7)$$

$$v_1 + u(t_1^1) \geq 0 \quad \text{(個人合理性条件)} \quad (8)$$

前節と異なるのは、モニタリング・インセンティブ条件だけである。理由は、このタイプのドライバーは部分モニタリングで規制速度を選ぶからである。

政府の問題は、三つの条件 (6), (7), (8) の下で、利得 $B - t_1^1$ を最大にするように罰金・報酬 (t_0^1, t_1^1) を選ぶことである。そのようなものを最適罰金・報酬と呼ぶ。このとき

定理 2 ([7]). 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罰金・報酬は

$$\begin{aligned} t_0^1 &\leq u^{-1}(v_1 - v_0) < 0, \\ t_1^1 &= 0 \end{aligned}$$

を満たす。この下で、ドライバーは完全モニタリングで情報を開示し、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走行に対する罰金 $|t_0^1|$ は、部分モニタリングでの罰金 $|t_0^0|$ よりも小さくできる。

4.2.3 非対称情報下での問題

本節では、ドライバーの実勢速度に関わる効用が v_{0H} で高いタイプ（高タイプと呼ぶ）、そして効用が v_{0L} で低いタイプ（低タイプと呼ぶ）がいるとする。

一つ目のタイプは、部分モニタリングで実勢速度を選択する程度に実勢速度に関わる効用が高く、式 (1) を満たす。二つ目のタイプは、その反対に、部分モニタリングで規制速度を選択する程度に実勢速度に関わる効用が低く、式 (2) を満たす。

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。このとき、タイプ別に、罰金・報酬を導入し、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、個人合理性と計六つの条件のもとで、政府は期待利得を最大にするように罰金・報酬を求める。文献 [7] で示されたように、この問題は、4.2.2 節で議論した高タイプのみを考慮した問題に帰着できる。

5. おわりに

これまで自動車は、燃費、排出ガス、衝突安全、操縦安定性などさまざまな商品への要求と時として他律背反となる技術課題に対して、材料技術、構造設計、工法、生産技術などを駆使した開発の追求で高品質な国際商品としてグローバル展開がなされてきた。そして、社会基盤は自動車の進展に合わせてどちらかと言えば受身的に整備されてきた。3 万点以上の部品から構成される自動車はその成立に高度でかつ複雑な擦り合わせ技術を必要としており、そのサプライチェーンの裾野は広く精緻である。これからのモビリティイノベーションは自動車だけでなく、IoT や IoS が付帯される道路インフラやエネルギーステーションとまちや都市という社会基盤までもが、今後の普及や発展に相互に影響を及ぼすことになる。自動運転を前提とする都市計画、まちづくりから再生エネルギーを前提とするモビリティ普及など多面的な取り組みが世界各国ですでに始まっている。

1970 年に筑波研究学園都市計画法が制定され、筑波大学を始め多くの国立研究所があるつくば市は国内屈指の研究学園都市である。研究学園都市へのモビリティイノベーションの社会実装に向けた先端研究にマーケットデザインとオペレーションズ・リサーチは必須である。燃料電池自動車と水素ステーション配備、再生エネルギー活用まで含む水素社会の実装やフィンテックと連動するシェアリングの社会実装など直ちに想像いただける。これらの研究開発では、データ利活用を視野に入れたマーケットデザインやオペレーシ

ンズ・リサーチによる最適化モデルなどを整理したうえで、実益的なコンセプト検証を図る現場を共有する産学連携、オープンイノベーションが望ましいと考えている。2020年には筑波研究学園都市計画制定50年の節目となる。次なる50年の研究学園都市の発展に資する移動の自由を実現する研究開発を推進する。周辺の常総市や石岡市（旧八郷町）などと防災や再生エネルギーと景観保全などの具体的な社会課題解決に向けたモビリティイノベーションの社会応用の研究も着手する。これらの研究成果は今年度の産業競争力懇談会の最終提言書に反映する計画であり、その内容は同懇談会ホームページに掲載予定である。

参考文献

- [1] 内閣府ホームページ, http://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html (2018年4月3日閲覧)
- [2] 内閣府, 「Society5.0とは」, http://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/society5_0-1.pdf (2018年4月3日閲覧)
- [3] L. Hurwicz, “On informationally decentralized systems,” *Decision and Organization*, G. B. McGuire and R. Radner (eds.), North Holland, 1972.
- [4] 伊藤秀史, 『契約の経済理論』, 有斐閣, 2003.
- [5] T. Börgers, *An Introduction to the Theory of Mechanism Design*, Oxford University Press, 2015.
- [6] 内閣府, 「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」, http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf (2018年5月21日閲覧)
- [7] 栗野盛光, 高原勇, “IoT 車両情報の速度に関するモニタリング選択問題,” *応用地域学研究*, **20**, pp. 25–35, 2016.