

基礎研 レポート

自動運転とAIのフレーム問題

AIの社会実装へのインプリケーション

社会研究部 上席研究員 百嶋 徹

(03)3512-1797 hyaku@nli-research.co.jp

1—はじめに

筆者は、「[AI・IoTの利活用の在り方](#)」『ニッセイ基礎研所報』2019年Vol. 63、2019年6月にて、「人工知能（AI）の社会実装には、AI研究の最大の難問と言われる『フレーム問題』が横たわる。フレーム問題とは、世の中で起こり得るすべての事象から、今行うべき分析・判断に必要な情報のみを『枠（フレーム）』で囲うように、選び出すことがAIには非常に難しい、という本質的な問題だ」と指摘した。

一方、AIの利活用分野として、自動運転への期待は大きいですが、その実用化においても、AIのフレーム問題への対処が重要なカギを握る。筆者は同稿にて、「チェス、将棋、囲碁といったボードゲーム、生産ラインにおける組立作業、画像認識や音声認識などのように、フレームをはめることができる限定された環境・空間の下で特定のタスクをAIに担わせる場合は、AIは強みを存分に発揮し、その社会実装・実用化が進みやすい。一方、現実社会の複雑な環境下で用いられる自動運転技術では、基本的にフレーム問題の影響は大きいと考えられるが、道路・走行環境が最も複雑な都市部の一般道に比べ、フレーム問題の影響が相対的に小さい高速道路や過疎地にエリアを限定した走行環境での実用化を先行させることは、フレーム問題の観点から理にかなっていると言えよう」と指摘した。

本稿では、これらの筆者の指摘を深掘りしたい。すなわち、AIのフレーム問題について説明した上で、AIの利活用分野として大いに期待がかかる自動運転を取り上げ、AIのフレーム問題から見た技術的課題を考察することで、AIの社会実装の在り方へのインプリケーションについて論じたい。

2—AIのフレーム問題と社会実装

1 | AIのフレーム問題とは

AI¹の社会実装においては、AI研究の最大の難問と言われる「フレーム問題」²が横たわることに留意しなければならない。そして、AIを開発・進化させる科学者・開発者やそれをツールとして社会に実装・利活用する企業経営者など人間が、そのフレーム問題を回避するような工夫をしっかりと凝らすことが不可欠だ。

AIのフレーム問題は、AIの名付け親で初期のAI研究の第一人者であるジョン・マッカーシーとパトリック・ヘイズが1969年に提唱したものでAI研究の古典だが、未だに未解決である、とされる。

冒頭に記述した通り、本稿では、フレーム問題とは、「世の中で起こり得るすべての事象から、今行うべき分析・判断に必要な情報のみを『枠（フレーム）』で囲うように、選び出すことがAIには非常に難しいという問題」と定義する。このため、どんな方法を取っても、本来関係のない無視すべき膨大な事象を含めて、世の中のありとあらゆる事象について、関係のある必要な情報かどうかをイチから1つずつ確認しなければならない、そのために情報処理における計算量が爆発的に増加してしまい、有限の情報処理能力しか持たないAIは停止してしまい、今行うべき問題解決ができなくなるのである。

筆者は、「[AI・IoTの利活用の在り方](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2019年3月29日にて、「そもそもAIは、ディープラーニング（深層学習）の過程で学んでいない想定外の事象に対して、臨機応変に対応することができない」と指摘した。フレーム問題には、「AIのプログラムの中に、想定外の事象を含めて、世の中で無限に起こり得るすべての事象を原理的に記述し切れない（＝AIに覚え込ませることはできない）」という、構造的な問題も含まれる。また、現在のAIは、自らが解くべき問題を設定することもできない（＝与えられた問題以外を解くことはできない）。

2 | AIの社会実装には「限定された閉じた世界」を作る人間の役割が極めて重要

想定外の事象が無限に起こり得る複雑な現実世界は、フレーム問題を抱えるAIが最も苦手とする環境である、と言える。問題設定も曖昧なままにフレーム問題を回避するための何の工夫も施さずに、人間がAIを複雑な現実世界に放り出すと、AIは途方に暮れて立ち尽くしてしまい、身動きが取れなくなるリスクが高まるのだ。

このため、AIを現実世界に実装し、問題解決のスピードの速さや精度の高さなどAI本来の強みを存分に発揮させるためには、AIがフレーム問題に直面して悩まないように、社会実装を行う人間がフレーム問題をうまく回避できるような環境を人為的に整えてやることが、極めて重要となる。つまり、AIが思う存分活躍できる舞台を設定してやることは、人間が果たすべき極めて重要な役割なのだ。

AIが問題解決に無関係な事象をいちいち探し出し、それらを無視することに自らの計算リソースを浪費せずに、関係のある重要な事象を分析・判断することに貴重な計算リソースを集中できるように

¹ 現在実用化されているAIは、特定のタスクしかこなせない「特化型AI」である一方、人間のように多様なタスクをこなせる「汎用AI（AGI：Artificial General Intelligence）」は、現在のテクノロジーの延長では実現しない、とされる。特化型AIは「弱いAI」、AGIは「強いAI」とも呼ばれる。本稿では、現在のAIである特化型を前提として議論を進めることとする。

² AIのフレーム問題に関わるより詳細な説明は、巻末の＜補論＞を参照されたい。

するためには、AI が解くべき問題を人間が明確に設定した上で、問題解決に必要な有限の事象群をフレームで囲い、AI がそれらを選び出せるようにしてやる必要がある。

具体的には、「フレームをはめることができる限定された環境・空間」の下で、AI に特定のタスクを明確なルールに基づいて実行させる、ということである。そうすれば、複雑な現実世界の中に「限定された閉じた世界（環境）」を人為的に作ることができ、このような環境下では、AI は想定外の事象に直面することもなく、フレーム問題に対処する必要がなくなるのだ。人間からすれば、AI のために閉じた環境を作ってやることにより、AI の社会実装の難度を下げることにつながる、と言える。

実際、人間が設定した限定された閉じた環境下で、AI やロボットの社会実装・実用化が進展している。例えば、チェス・将棋・囲碁の専用 AI、検索サービスや EC サイトでユーザーの検索や購買の履歴傾向などを分析してユーザーに合った検索結果の導出や商品の推奨を行うレコメンドエンジン、家庭用ロボット掃除機、スマートフォンの音声アシスタント機能用 AI、スマートスピーカー（AI スピーカー）、工場の生産ラインにおける組立作業用 AI 搭載ロボット、工場の製品品質検査工程における製品の外観（欠陥）検査用 AI、電子材料など機能性材料の設計・開発工程においてビッグデータや AI の活用を取り入れた最適な材料設計のための新たな方法論であるマテリアルズ・インフォマティクス、大型物流センターにおける自動搬送用 AI 搭載ロボット、防犯・監視・入出国管理などに用いる顔認証 AI システム、医療画像診断支援用 AI、などが挙げられる。

このように現在の AI は、閉じた環境さえ与えられれば、ボードゲームから生活、製造業（研究開発・生産・品質検査）、物流業、セキュリティ、医療などに至るまで、幅広い多様な分野で大活躍しており、社会のための不可欠な存在となっている。

3—AI のフレーム問題から見た自動運転の技術的課題の考察

1 | 大変革の時代に入る自動車産業と自動運転

今、自動車産業は「100 年に一度の大変革の時代」に入っているとされ、この大変革の時代のキーワードは「CASE」である、と言われる。CASE は、「Conected（インターネットへの常時接続）」「Autonomous（自動運転）」「Shared&service（シェアリング・サービス化）」「Electric（電動化）」を指し、C・A・E はテクノロジー領域、S はサービス領域に分類でき、4 つの要素は互いに密接に関連している。また、この 4 つの要素が進化・融合すれば、大変革時代の自動車産業におけるもう 1 つのキーワードである「MaaS（Mobility as a Service）」³と呼ばれる新たなモビリティサービスに、カーシェアリングやタクシー・バスなどとして自動車が組み込まれやすくなる、と考えられる。

CASE の 4 つの要素の中でも、自動運転は、既存の自動車関連メーカー（完成車、部品）に加え、巨大デジタル・プラットフォーマーやライドシェア（配車）サービスの世界大手などの異業種のプレーヤーも交えて開発競争にしのぎを削る、大変革時代の象徴的領域と言える。

筆者は、「[AI・IoT の利活用の在り方](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2019 年 3 月 29 日に

³ 政府高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部「官民 ITS 構想・ロードマップ 2019」において、MaaS とは、「出発地から目的地まで、利用者にとっての最適経路を提示するとともに、複数の交通手段やその他のサービスを含め、一括して提供するサービス」と定義されている。「複数の交通モードを統合し、一元的に検索・予約・決済が可能な」サービスとされる。

て、「自動運転技術では、心臓部の AI の能力強化のために、公道や専用のテストコースでの実走行試験やサイバー空間でのシミュレーションから取得される、膨大な走行映像データをディープラーニングにより AI に学習させる必要があるため、現時点ではこの画像データの収集・蓄積自体も、極めて重要な競争領域とみなされている」と指摘した。

自動運転は 5 段階のレベルが規定されているが、人間の操作が介在しないレベル 4 以降を「完全自動運転」と呼ぶ（図表 1）。レベル 4 はエリアや時間などの限定条件付きで、レベル 5 は限定条件なしで、自動運転システムがすべての運転タスクを行うものだ。レベル 2 まではドライバーへの「運転支援」の位置付けであり、レベル 3 以降が自動運転の段階となる。レベル 3 は、限定条件下でシステムがすべての運転操作を行うが、緊急時などシステムからの要請があれば人間が操作を引き継ぐ必要がある段階を指す。

米国や中国など海外先進地域では、既に完全自動運転の実走行試験が行われている一方、実用化（市販）の段階はレベル 2 にとどまり、いわゆる自動運転の段階は実現できていない。因みに、「独アウディは、2017 年に（※世界で初めて）レベル 3 の技術を市販車に搭載したが、世界の法整備が追いつかず機能を抑えて販売している」⁴という。

図表 1 自動運転レベルの定義の概要

| レベル | 名称 | 定義概要 | 安全運転に係る監視、対応主体 |
|------------------------------|----------|--|--------------------------|
| 運転者が一部又は全ての動的運転タスクを実行 | | | |
| 0 | 運転自動化なし | • 運転者が全ての動的運転タスクを実施 | 運転者 |
| 1 | 運転支援 | • システムが縦方向又は横方向のいずれかの車両運動制御のサブタスクを限定領域において実行 | 運転者 |
| 2 | 部分運転自動化 | • システムが縦方向及び横方向両方の車両運動制御のサブタスクを限定領域において実行 | 運転者 |
| 自動運転システムが（作動時は）全ての動的運転タスクを実行 | | | |
| 3 | 条件付運転自動化 | • システムが全ての動的運転タスクを限定領域において実行 • 作動継続が困難な場合は、運転者がシステムの介入要求等に適切に回答 | システム (作動継続が困難な場合は運転者) |
| 4 | 高度運転自動化 | • システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への回答を限定領域において実行 | システム |
| 5 | 完全運転自動化 | • システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への回答を無制限に（すなわち、限定領域内ではない）実行 | システム |

（資料）内閣官房 IT 総合戦略室「自動運転に係る制度整備大綱（概要）」2018 年 4 月 17 日より引用。表の左の矢印およびコメントは筆者が加筆。

2 | AI のフレーム問題の影響が大きい自動運転の社会実装の難しさ

現実社会の複雑な環境下で用いられる自動運転技術では、基本的に AI のフレーム問題の影響は非常に大きいと考えられ、自動運転の実用化は、AI の社会実装における最大のチャレンジである、と言っても過言ではない。

⁴ 日本経済新聞 電子版 2019 年 7 月 4 日「ホンダ、『レベル 3』を来年実現 高速渋滞時に」より引用。ただし、（※）は筆者による注記。

① 自動運転システムの誤認識・誤作動の事例

複雑な道路・走行環境で起こり得る、無数の想定外の事象が、自動運転システムの誤認識・誤作動を誘発する可能性もあろう。

例えば、経済産業省・国土交通省は、ラストマイルモビリティ⁵として国立研究開発法人産業技術総合研究所が受託開発した、レベル4相当の技術を搭載した小型電動カートの無人自動走行（遠隔監視・操作）の実証実験を石川県輪島市の市街地一般公道で2017年12月に行ったが、「課題も浮き彫りとなった。理由の1つが予想外の積雪だ。コース上に雪が残り、車載センサーの誤作動を誘発。雪を障害物と認識し、実験車両が停止してしまうことがあった」⁶という。

また、スイス有数のワインの産地であるヴァレー州シオン市の旧市街では、2016年から自動運転シャトルバスが試験走行しているが、「通りの鉄柵から垂れ下がっていた植物の枝や葉が風で揺れると障害物だと認識し、バスはプログラムに従って減速または完全停止する」⁷という。

直近では愛知県豊田市で、名古屋大学が開発したゴルフカートをベースとした低速自動運転車両が、2019年8月に同大学や市などが共同で実施予定だった中心市街地（市道）での実証実験に向けて、同月試験走行していたが、後ろから来た一般車両が実験車両の右側を追い越そうとした際、実験車両が右側に寄ったことにより接触する事故を起こした。システムが自車位置・方向を誤検知したことが、事故の推定原因だという⁸。名古屋大学内に設置された事故検証委員会にて今回の事故の原因が究明され、再発防止策が装備されるまで、公道実証実験は停止するという。

② 市街地・都市部の一般道がフレーム問題の影響を最も受けやすい

上記はいずれも市街地の一般道での事例だが、まさに市街地や都市部の一般道が最も複雑な道路・走行環境であり、フレーム問題の影響を最も受けやすい、と言える。さらに、自動運転車と従来の手動運転車が道路上で混在する状況が加わると、その環境は複雑化に一層拍車がかかる、と考えられる。ドライバーや歩行者が行う手での合図やアイコンタクト、警察官が道路上で行う指示、自転車やオートバイの挙動、他のドライバーの自動運転車に対する反応などを含め、人間の交通・運転マナーや交通ルールに関わる判断・反応・行動は無数にある上に、まちまちで不規則になりがちであるため、自動運転車がそれらすべてに対応し切れないということは、まさにフレーム問題の影響を大きく受けることを示している、と言えよう。

今後自動運転技術が社会実装されて本格的に普及し、常に交通ルールを厳格に順守する自動運転車だけが走行する時代が到来すれば、少なくとも車車間の複雑性は劇的に緩和され、交通事故の大幅削減などに貢献するだろうが、そのような状況に至るまでには、まだまだ時間がかかるとみられる。米国で自動運転技術やAI技術などの研究開発を行うトヨタ自動車の子会社 Toyota Research Institute

⁵ 鉄道・バスなどの基幹交通システムと自宅や目的地との間、地域内といった短中距離を補完する次世代交通システムを指す（産業技術総合研究所ニュース2017年12月13日「ラストマイル自動走行の実証評価（輪島市）を開始」。「端末交通システム」とも言う。

⁶ 日刊工業新聞ニュースイッチ2018年5月6日「全国で実証進む自動運転、実用化へ立ちはだかる壁」より引用。

⁷ ビッグイシュー・オンライン2018年10月22日「自動運転車の実用化に向けた技術的・倫理的・社会的課題とは」より引用。このシャトルバスには、「安全パイロット」と呼ばれるスタッフが同乗してあらゆる状況を監視し、必要に応じて介入するのだという。従って、定義上はレベル3に分類されるとみられる。

⁸ 豊田市・報道発表資料2019年8月29日「低速自動運転車両の事故の推定原因について」を基に記述した。

(TRI) の CEO (最高経営責任者) である、ギル・プラット氏は、「例えば米国で、レベル 4 以上の自動運転車が街中を走るクルマの多くを占めるには、数十年もの時間がかかる」⁹と米ラスベガスで毎年開催される 2017 Consumer Electronics Show (CES2017) で述べている。

③ 無限の交通シーンの再現・学習＝完璧なアルゴリズムの作成の難しさ

筆者は、「[AI・IoTの利活用の在り方](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2019年3月29日にて、「自動運転技術の安全性を極限まで高めるためには、実走行試験に加えサイバー空間でのシミュレーションも駆使して、地域ごと、専用道・一般道ごとに想定され得る交通シーンを網羅的に AI に学習させる必要があり、そのためには、気の遠くなるような無限に近い地道な開発作業が必要となるだろう」と指摘した。このような完全なアルゴリズムに少しでも近づけるべく、想定外の事象を可能な限り一つ一つつぶすために、自動車メーカーや巨大デジタル・プラットフォーマーなど自動運転の開発に取り組む企業は、膨大な走行データの収集に日夜しのぎを削って取り組んでおり、このこと自体は社会的価値の高い企業努力である、と評価できる。

しかし、筆者が同稿にて指摘したように、無限に近い交通シーンを再現して AI に学ばせることは、フレーム問題などに起因して現実的には難しい。このことは、想定外の事象を完全排除できる、すなわち事故率がゼロとなるような、完璧なアルゴリズムの作成が難しいことを意味する。自動運転による事故率は勿論、手動運転によるそれを下回ることが望まれるが、自動運転によっても事故率がゼロにならないなら、自動運転による事故率がどれくらいの水準であれば安全とみなすのか、線を引く必要がある。このため、「世界の監督官庁にとって自動運転の安全性評価は共通の課題だ。『何をもって安全とするのか』が未だ確立されておらず、各国でも議論が始まったばかりだ」¹⁰。

前出のギル・プラット氏は、このような論点を含めて、技術的・社会的側面から見た自動運転の社会実装の難しさについて、CES で非常に真摯な姿勢で語っている。CES2017 でのスピーチでは「歴史的に、人々は、機械の不具合によるケガや死亡を一切許容しないということが示されています。そして、自動運転車の性能を左右する人工知能システムは、現時点では不完全であることが避けられないことを私たちは理解しています。では、どのくらいの安全が必要十分な安全なのか。非常に近い将来、この質問への答えが必要になります。私たちはまだ確かな答えを持ち合わせていません」「総合的には、試作段階の私たちの自動運転は様々な状況に対処できます。しかし、機械の対応能力を超える状況は未だに数多くあります。レベル 5 の自動運転で必要になる完全性を実現するためには、何年もの機械学習や何マイルものシミュレーション・実走行によるテストが必要になるでしょう」¹¹と語り、さらに直近の CES2019 では「これ (※レベル 5 の自動運転) はすばらしい目標ですし、私たちもいつかは達成できるかもしれません。しかしながら、こうした自動運転システムが抱える、技術的・社会的な難しさを甘く考えてはいけないと思っています。たとえば、絶え間なく変わる環境において、人間のドライバーと同等の、もしくはそれより優れた運転をするうえで必要な社会順応性をどのようにシ

⁹ トヨタ自動車 HP2017年1月5日「トヨタ・リサーチ・インスティテュート ギル・プラット CEO スピーチ参考抄訳 (CES プレスカンファレンス)」より引用。

¹⁰ 日刊工業新聞 2019年2月27日「自動運転、乗り越えるべき壁 (上) レアケースの収集」より引用。

¹¹ 注9と同様。

システムに教えるのか。いつ歩行者が道を渡るか、もしくは交差点の信号が青なのに、警察官が『止まれ』のサインを出した際に警察官が指示していることをどのようにシステムに教えるのか。それに、自動運転車両でも発生が避けられない事故や死傷を社会が受け入れるには、相当な長い時間がかかることも気にとめなくてはなりません。自動車業界においても IT 業界においても、いま述べたような質問に完全に答えられる人はいないと思います¹²と語った。

同氏のこれらのコメントは、AI に複雑な交通シーンを網羅的に覚え込ませ、ひいては完全自動運転の社会実装を果たすことが、フレーム問題などのために、いかに難しいかを明確に示唆している、と思われる。

3 | 自動運転の社会実装における AI のフレーム問題への対処

① 狭い ODD（限定領域）での実用化の先行

それでは、自動運転の開発・社会実装において、フレーム問題にどう対処すべきだろうか。自動運転の場合も、前述したように、ルールが明確で想定外の事象が起こりにくいようデザインされた、閉じた環境での実用化を先行させることが定石である、と言えよう。すなわち、いわゆる「運行設計領域」（ODD：Operational Design Domain、「限定領域」とも言う）の限られた時空間での実用化をまずは先行させることが求められる。

ODD とは、「自動運転システムが正常に作動する前提となる設計上の走行環境に係る特有の条件」のことを言い、それに含まれる走行環境条件としては、例えば、道路条件（高速道路、一般道、車線数、車線の有無、自動運転車の専用道路等）、地理条件（都市部、山間部、ジオフェンスの設定等）、環境条件（天候、夜間制限等）、その他の条件（速度制限、信号情報等のインフラ協調の要否、特定された経路のみに限定すること、保安要員の乗車要否等）、が挙げられる¹³。すべての運転タスクをシステムが担う完全自動運転であれば、条件付きであるためレベル 4 に相当する。

日本政府は、国の実施する公道実証プロジェクトの推進において、自動走行実現に向けた基本的なアプローチとして、「社会課題の解決に向けたニーズの高い場所で、適切に安全を確保しながら、社会受容性を高め、簡単なシーン（専用空間、地方）から複雑なシーン（一般道路、都市部）へ活用を拡大¹⁴していくことを想定している。さらに、この走行環境の複雑性の軸（図表 2 の縦軸）に、低速・中速・高速（高性能）で表した車両性能の軸（図表 2 の横軸）を加えた 2 軸でプロジェクトの難易度を示し、イメージとしては、Step1 が「閉鎖空間で低速走行」、Step2 が「（他の交通参加者との）混在交通下で地方にて中速走行」、Step3 が「混在交通下で都市部にて高速走行」を表し、Step が上がるごとに難易度が高まり、実証事業のレベルアップが図られることを想定している。

この難易度は、フレーム問題の影響度合いと連動していると考えれば、フレーム問題の影響が相対的に小さい、専用（閉鎖）空間・低速運転・地方などの要素を満たす限定した走行環境での実証・実用化を先行させることは、フレーム問題の観点からも理にかなっている、と言えよう。

¹² トヨタ自動車ホームページ 2019 年 1 月 8 日「CES 2019 トヨタ・リサーチ・インスティテュート（TRI）ギル・ブラット CEO スピーチ参考抄訳」より引用。ただし、（※）は筆者による注記。

¹³ 国土交通省自動車局「自動運転車の安全技術ガイドライン」2018 年 9 月より引用。

¹⁴ 経済産業省製造産業局「自動運転を巡る経済産業省の取組」2018 年 2 月 16 日より引用。

図表 2 国の実施する自動運転公道実証プロジェクトの方向性



(資料)内閣官房日本経済再生総合事務局「国の実施する公道実証プロジェクトの方向性と共有すべきデータについて」自動走行に係る官民協議会（第2回）2017年9月28日より引用。

② 狭い ODD（限定領域）の具体例

＜過疎地などの地方エリアでの低速走行＞

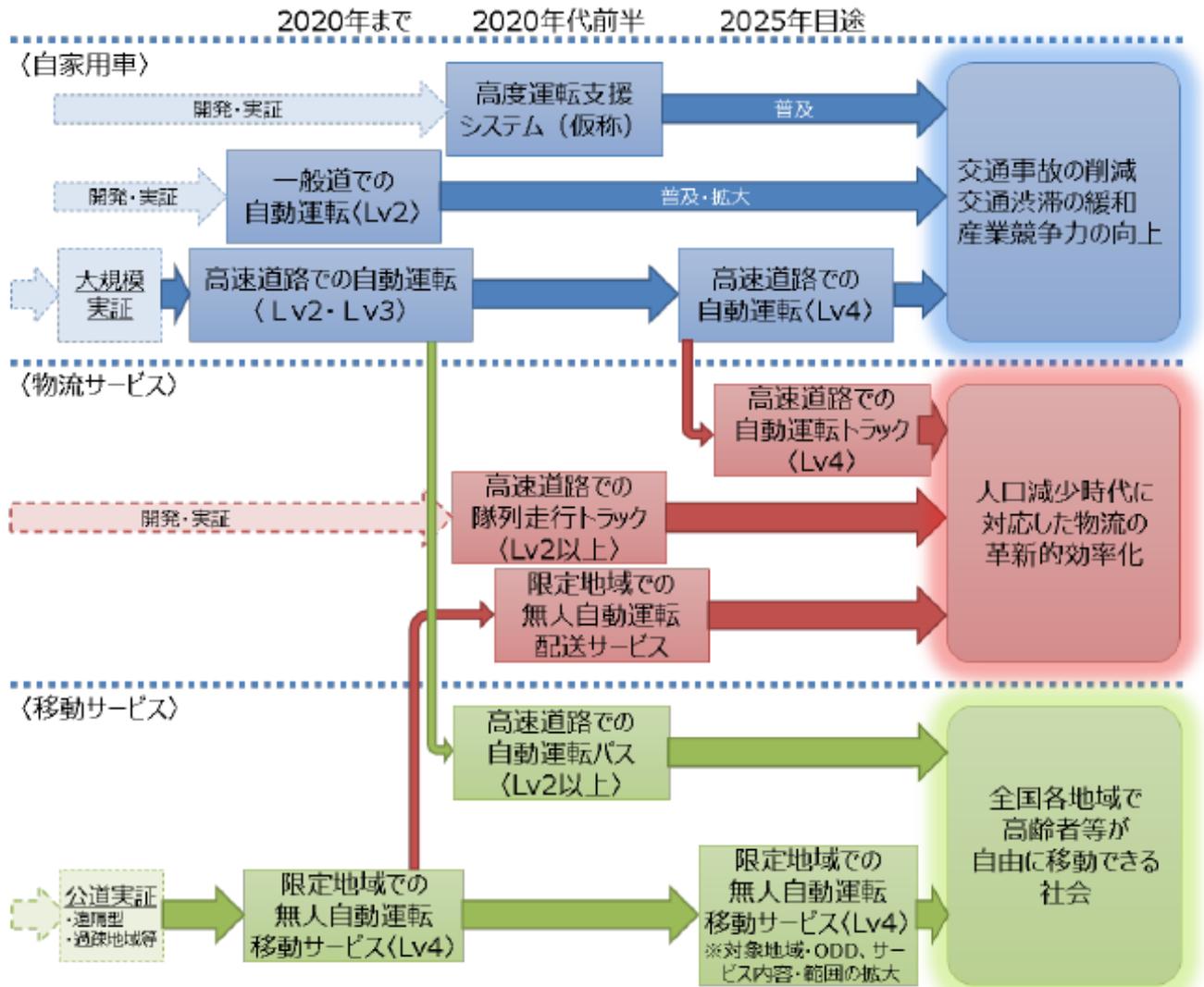
最も単純（簡単）な狭い ODD の具体例としては、過疎地などの他の交通参加者との接点の少ない地方エリアでの低速走行が挙げられる。このような ODD において、ドアツードア方式など柔軟な運行を行うデマンド型交通サービス（乗合タクシー・バスなど）や、公共交通・拠点施設と自宅を結ぶラストマイル移動を担う小型パーソナルモビリティ（電動カートや超小型 EV など）など、新たなモビリティサービスや移動体に自動運転技術を導入すれば、公共交通の維持が難しい過疎地など地方在住の高齢者などが直面する移動弱者問題という、深刻な社会課題の解決につながり得る、とみられる。

政府の高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部（IT 総合戦略本部、本部長・安倍晋三首相）が毎年発表する「官民 ITS 構想・ロードマップ」の最新の 2019 年版においても、2020 年に過疎地などの限定地域において、いち早くレベル 4 の無人自動運転移動サービスの提供を実現し、2025 年を目途に限定地域での同サービスの全国普及を目指すことが、謳われている（図表 3）。

＜高速道路での走行＞

上記より ODD は広がるものの比較的狭い ODD として、歩行者や自転車がいない高速道路での走行が挙げられる。前出の「官民 ITS 構想・ロードマップ 2019」で政府は、高速道路での自家用車の自動走行について、2020 年目途に緊急時にのみ人間が操作するレベル 3 のシステムの市場化、2025 年目途にレベル 4 の完全自動運転システムの市場化を、目指すべき努力目標として設定した（図表 3）。

図表3 2025年完全自動運転を見据えた市場化・サービス実現のシナリオ



(資料) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議「官民 ITS 構想・ロードマップ 2019」2019年6月7日より引用。

<都市部・市街地の一般道の優先・専用レーンでの走行>

都市部や中心市街地の一般道は、前述の通り、最も複雑な道路・走行環境ではあるが、ここに自動運転車の優先レーンさらには専用レーンを設ければ、他の交通参加者との接点を減らすことができ、専用空間に近い比較的狭い ODD を設定することができるだろう。このような空間では、自家用車の自動走行だけでなく、低速走行のレベル 4 相当の自動運転バスや自動運転タクシーなどを活用した、新たな都市のモビリティサービスを展開することも考え得るだろう。

<先進的スマートシティでの先行的な社会実装>

人口減少・少子高齢化、環境・エネルギー、防災減災・インフラ、交通・モビリティ・物流、流通小売・電子決済、健康・医療・福祉、教育、情報セキュリティ、地域・都市の再生・活性化など、複合化した多様な社会課題を解決するために地域・都市に新たに構築される、先進的な「分野横断型ス

「スマートシティ」¹⁵では、IoT（モノのインターネット）、ビッグデータ、AI、ロボット、自動運転など最先端テクノロジーの社会実装が極めて重要なポイントとなる¹⁶。その際に、建物やインフラなど地域・都市のあらゆる構成要素・機能に各種センサーや高精細カメラなどのIoTデバイスが搭載され、街全体が通信ネットワークでつながる「コネクテッドシティ（つながる街）」へと進化していくことが欠かせない。

地域・都市というフィジカル空間（実世界）で生み出されるビッグデータを、個人情報保護に十分に留意しつつ、サイバー空間（仮想空間）でAIにより解析し、地域・都市で活動する産学官の多様な主体が、この解析結果を地域・都市のあらゆる構成要素・機能・サービスの管理・運営の効率化・高度化に活かすことができれば、地域・都市全体の最適化が図られ、多様な社会課題は解決に向かうだろう。

最先端テクノロジーを活用して社会課題を解決する、第4次産業革命やSociety5.0の本質は、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合・連動するCPS（Cyber Physical Systems）にあるが、先進的なスマートシティは、「CPSを先行的に街まるごとで応用・実践できる絶好のフィールド」である、と言えよう。また、自動運転自体の構造もCPSそのものであり、スマートシティの重要なパーツの1つとなる。このため、従来はサイバー空間でのビジネスをメインとしてきた巨大デジタル・プラットフォームが、自動運転技術の開発とともに、フィジカル空間での街づくりにも積極的に乗り出してくることがあっても、まったく不思議ではない。

このように、「最先端テクノロジーの実装により多様な社会課題を解決するコネクテッドシティ」である先進的なスマートシティは、街全体が閉じたODDと捉えることもでき、コネクテッドカー（インターネットでつながる車）の要素も併せ持つ自動運転車の社会実装との親和性は、非常に高い。とりわけ先端テクノロジーのスピーディな社会実装を進めやすい、グリーンフィールド（新規開発）型のスマートシティは、最先端の自動運転技術の「先行的な実装フィールド」である、と考えられる。このため、世界の先進的なスマートシティの開発では、自動運転技術の実装は、交通事故・交通渋滞、高齢者などの移動弱者問題、トラック・タクシー・バスのドライバー不足、気候変動問題など、現代のモビリティ社会が抱える課題の解決に資する、次世代の先進モビリティとして、必要不可欠な重要な構成要素となってきた。レベル4の自動運転車を活用した、ライドシェア、カーシェア、ラストワンマイルサービスなどの新しいモビリティサービス事業の育成、さらにはクルマ以外の多様な交通モードも組み合わせたMaaSの推進・展開へとつなげることが想定されている、とみられる。

例えば、米アルファベット（Googleを傘下に持つ持株会社）は、子会社ウェイモを通じて自動運転技術の研究開発で先行する一方、カナダ・トロント市のウオーターフロント地域でカナダ政府やトロント市が推進するスマートシティ開発プロジェクトに子会社サイドウォーク・ラボを通じて参画し

¹⁵ 日本政府が推進する複数の規制改革を一体的に進める総合的な「まるごと未来都市」、いわゆる「スーパーシティ」構想とはほぼ同様の考え方であると思われる。

¹⁶ 先進的なスマートシティの構築における最先端テクノロジー実装の重要性については、拙稿「エコノミストリポート／カナダ、中国でスマートシティー Google系も街づくりに本格参入 データ連携基盤の構築がカギ」毎日新聞出版『週刊エコノミスト』2019年10月29日号、同「[地域活性化に向けた不動産の利活用—国土交通省『企業による不動産の利活用ハンドブック』へ寄稿](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2019年7月11日、同「寄稿 ハンドブック発刊によせて／地域活性化に向けた不動産の利活用」国土交通省土地・建設産業局『企業による不動産の利活用ハンドブック』2019年5月24日を参照されたい。

ている。ウォーターフロント地域全体の敷地面積は約 325 万㎡だが、そのうち 4.9 万㎡のキーサイド地区から開発をスタートさせ、多様な社会課題を解決するスマートシティを建設する¹⁷。「IDEA」と名付けられた対象エリアでは、持続可能な都市を目指し、先端技術とデータを駆使して、自動運転など新たな移動手段、モジュール化した木造建築、ゴミの自動収集などに取り組む。アルファベットは、巨大デジタル・プラットフォーマーが自動運転と街づくりの両方の領域への新規参入を試みる、代表的な先進事例だ。

また、中国・河北省雄安新区では、2017 年から国家主導による大型都市開発が進行中だ。雄安新区は、深セン経済特区や上海浦東新区に続く、壮大な国家プロジェクトであり、習近平国家主席肝煎りの「千年の大計」と位置付けられている。全体の対象エリアは 1,770 km²と広大だ。典型的なグリーンフィールド型のプロジェクトであり、これから建設が本格化するが、一部竣工済みの地区で、AI やロボットを導入し、自動運転バスや無人スーパーの実証実験が始まっている。中国の 3 大 IT 企業 BAT（バイドゥ、アリババ、テンセント）は、いち早く雄安に拠点を設けて集結している。この中で自動運転の社会実装は、バイドゥがけん引する。

4 | 狭い ODD (限定領域) での完全自動運転へシフトする米国の主要企業

自動運転では、フレーム問題を回避するために、狭い（閉じた）ODD を設定し、そこでの社会実装を先行させるべきである、と筆者は述べてきたが、自動運転車の開発を手掛ける自動車メーカーや IT 企業の経営幹部からも、最近、同様の趣旨の発言が相次いでいる。

例えば、米フォード・モーターの CEO であるジム・ハケット氏は、「業界が『自律走行車の実現を買いすぎている』と、デトロイト経済界の会合で 2019 年 4 月 9 日（米国時間）に語っている。フォードは 2021 年までに無人運転車両を開発する目標を変えていないが、『その展開はジオフェンス（仮想境界線）の内側の非常に限られたものになる。なぜなら非常に複雑な問題をはらんでいるからです』と認めたのだ¹⁸という。

また、ウェイモ CEO のジョン・クラフチック氏は、「昨年 11 月に『自律走行の技術には必ず何らかの制約が伴う』と語り、本当にどこへでも行ける自律走行車は実現しないかもしれないと示唆した。ウェイモはフェニックス郊外で限定的な自動運転サービス¹⁹を提供しているが、安全のために必ず人間のオペレーターを運転席に座らせている²⁰という。

さらに、米ウーバーテクノロジーズの自動運転を統括するチーフサイエンティストのラケル・ウルタスン氏は、「自律走行車が実現する時期について、ロイターのインタビューに次のように語っている。『それは究極の難問です。わたしが最初に学んだのは、時期については約束しない、ということなんですよ』²¹と述べたという。「いまでは自律走行車がいつ実現するかではなく、どこで実現するかが

¹⁷ プライバシー保護やデータ管理に対する懸念が市民や関係者から示されており、現時点で未着工である。

¹⁸ WIRED 2019 年 4 月 11 日「完全自動運転の到来は、まだ先になる？ フォード CEO の発言に見る実現までの長い道のり」より引用。

¹⁹ ウェイモは、2018 年 12 月に自動運転車を使った配車サービスを米アリゾナ州フェニックスで始めた、と発表した。

²⁰ 注 18 と同様。

²¹ 注 18 と同様。

関心事なのだ。現時点での自動運転技術は、特定の条件下でのみ機能するように開発されている²²という。また、ウルタスン氏は、「自動運転はまずごく一部の地域で始め、そこから各地へと広げていきます。その転換を可能な限りスムーズに進めるのが難しいのです²³とも語ったという。

これらの米国主要企業の経営幹部の一連の発言は、「レベル4の完全自動運転の社会実装では、狭いODDの設定が極めて重要であり、しかも狭いODDから広いODDへと実用化の範囲を移行・拡大していくことが難しいこと」を示唆している、と思われる。

前述の通り、ギル・プラット氏が「米国の街中を走るクルマの多くをレベル4以上の自動運転車が占めるには、数十年もの時間がかかる」との見解を示したのに続き、上記の自動運転に関わる有数の米国企業の経営幹部たちからも、「完全自動運転の実用化では、限定された領域から広い領域へスムーズに移行することが非常に難しい」との趣旨の発言が相次いだ。このため、「自律走行車の装備は、『運行設計領域（ODD）』を受け入れる方向に進んでいる。近いうちにエンジニアは、システムが対処できる特定のタスクに自動運転の技術を集中させるだろう²⁴」との見方が出てきている。

このようにAIが最も得意とする狭いODDでの完全自動運転の実用化に、企業が経営資源を集中するのは、定石通りであり、フレーム問題というAIにとって極めて厄介な難問を回避しつつ、現在のAIの実力を勘案し、その強みを最大限に発揮させるための合理的な経営判断である、と言えよう。さらに、実走行試験などの開発コストは嵩むものの、完全自動運転システムが高精度に作動する狭いODDを国内や世界にいくつも作り出すことで横展開ができれば、一つ一つのODDが極めて限定的な範囲であっても、それらは社会的意義の高い事業活動である、と評価できよう。

5 | 完全自動運転システムと運転支援システムの「二刀流」に挑むトヨタ自動車

① 運転支援システム「ガーディアン」と完全自動運転システム「ショーファー」の同時並行開発

一方、ギル・プラット氏は、「確かなことは、完全自動運転という究極の目標に向かって取り組むプロセスにおいても、可能な限り多くの方々の命を救うことを追求しなければいけないということです。なぜならば、例えば米国で、レベル4以上の自動運転車が街中を走るクルマの多くを占めるには、数十年もの時間がかかるからです。だからこそ、TRIでは2種類のアプローチで取り組み、『ガーディアン（守護者）』と呼ぶ運転支援システムを開発すると同時に、『ショーファー（運転手）』と呼ぶレベル4・レベル5の完全自動運転システムにも注力しています。ショーファー（完全自動運転システム）を実現するために開発しているハードウェア・ソフトウェア技術の多くはガーディアン（運転支援システム）にも適用可能なものであり、その逆もまたしかりなのです。実際、ガーディアン、ショーファーともに必要とされる周辺認識・制御技術は基本的に同じものです。違いは、必要とされる場合にのみ機能するガーディアンに対して、ショーファーは、自動運転中は常に機能している点です²⁵とCES2017で述べた。

²² 注18と同様。

²³ 注18と同様。

²⁴ WIRED 2019年6月10日「自動運転は、いかに実現するのか：現状分析から見えた『6つの分野』での導入シナリオ」より引用。

²⁵ 注9と同様。

② 「ショーファー」の開発によりレベル5という究極の目標に果敢にチャレンジ

ギル・プラット氏は前出の通り、「レベル5の自動運転で必要になる完全性を実現するためには、何年もの機械学習や何マイルものシミュレーション・実走行によるテストが必要になるだろう」、「いつかはレベル5を達成できるかもしれないが、自動運転システムが抱える技術的・社会的な難しさを甘く考えてはいけない」、「米国の街中を走るクルマの多くをレベル4以上の自動運転車が占めるには、数十年もの時間がかかる」などと述べて、完全自動運転の難しさやその社会実装には極めて長期の期間を要することを十分に理解した上で、TRIではショーファー（Chauffeur）の開発により、レベル4以上の完全自動運転の実現に向かってチャレンジしている。

完全自動運転、とりわけレベル4からODDの限定を取り払ったレベル5という究極の目標への挑戦は、実現には困難が伴う「破壊的イノベーションの創出を目指し、従来の延長にない、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発、いわゆる『ムーンショット』」²⁶に果敢にチャレンジするスタンスを示している。

③ 高度安全運転支援システム「ガーディアン」の開発に同時並行で取り組む背景

TRIがショーファーの開発に挑む一方で、人間が運転することを前提に広い走行領域に適用され得る、高度安全運転支援システムであるガーディアン（Guardian）の開発に同時並行で取り組むのは、完全自動運転が社会実装され、交通事故が大幅に減少する時代が長期的に訪れたとしても、そこに至る期間においても、自動車メーカーとして手をこまねているわけにはいかない、というスタンスからだ。この点が、これまでも世の中に多くのクルマを送り出してきた自動車メーカーと、最初から主として無人運転による新しいモビリティサービスの提供を目指して、自動運転技術の開発に取り組む、デジタル・プラットフォーマーなど異業種からの新規参入組との、大きなスタンスの違いではないだろうか。

ガーディアンは、「人間の能力を置き換えるのではなく増大させるという考え方」で開発されており、「これから起こりうる事故を予測、ドライバーに注意を喚起し、ドライバーの操作と協調して修正制御を行う場合を除き、ドライバーは常に車のコントロールを行うことになり」、「人間と自動運転システムがチームメイトとしてお互いのベストの能力を引き出すようなシームレスで調和的な運転システム（※車両制御）である」²⁷。完全自動運転システムのショーファーと同様のテクノロジーが、惜しげもなくあえて安全運転支援システムのガーディアンに注入されており、自動車メーカー各社が既に搭載している、衝突被害軽減自動ブレーキ機能などのADAS（Advanced Driver Assistance System：先進運転支援システム）をより強力に進化させたものとなる。

この点は、AIの利活用について極めて有益な示唆を与えてくれる。「AIは、人間の労働（ここではクルマの運転操作）を奪うのではなく、人間と共生する良きパートナーとして、人間の潜在能力を引き出し能力を拡張させるために利活用すべきである」²⁸と筆者は考えているが、ガーディアンは、ま

²⁶ 内閣府ホームページ「ムーンショット型研究開発制度」より引用。

²⁷ 注12と同様。ただし、（※）は筆者による注記。

²⁸ AIの利活用の在り方に関わる筆者のこのような考え方については、拙稿「[製造業を支える高度部材産業の国際競争力強化に向けて（後編）](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2017年3月31日、同「[AIの産業・社会利用に向けて](#)」ニッセイ

さに人間の能力を拡張させるための AI 利活用の先進事例である、と評価できよう。

また、ギル・プラット氏は「自動運転の最も重要なメリットは、車を自動化させるということではない、ということです。そうではなく、ヒトが自立して自由に動き回れることだと考えます。自動運転とは、まず出来る限り多くの命を極力早く救えるようにし、かつドライビングをより安全に、しかし一方でより心を揺さぶるようなものにするのです」²⁹と CES2019 にて述べており、「自動運転で“Fun-to-Drive”（※運転する楽しさ）を目指している」³⁰。この点も、異業種参入組との大きなスタンスの違いだろう。ガーディアンは全走行を通して、道路状況やドライバーの反応をドライバーに意識させずに見守るとともに、ドライバーのミスや弱点をカバーすることにより、ドライバーは、車を自分の体の延長のように自由にコントロールしているように感じるが、実際には、ガーディアンがドライバーに運転を教え、ドライバーをフォローしているのだという³¹。

一方、デジタル・プラットフォーマーなど異業種参入企業は、むしろ運転タスクから人間を解放し、車内空間での新たな生活/ビジネスシーンを提案することにより、クルマを「再定義」「再発明」³²し、自動車関連産業に「破壊的イノベーション」³³を起こそうとしているのではないだろうか。

さらに、ギル・プラット氏は『『ガーディアン・フォー・オール (Guardian for all)』』という取り組みも最近始めました。『ガーディアン・フォー・オール』という考え方は 開発したシステムをトヨタのクルマだけでなく 他社のクルマにも使ってもらおうという考えです。私たちだけのガーディアンではなく、みんなのガーディアンなのです。人命が、一番大切だと信じているので、私たちは、全てのクルマ会社に この技術を提供したいと思っています³⁴と述べている。トヨタ自動車は、2015年に同社が単独保有している燃料電池関連の全特許の実施権を無償で提供することを発表して以降、「新技術・先進技術の占有より普及を優先する知的財産戦略」へ、自動車産業においていち早く転換したとみられ、「ガーディアン・フォー・オール（ガーディアンを全ての方に）」もその一環とみられる³⁵。

ガーディアンが運転支援システムとして単独で搭載される場合、前述の通り、ドライバーが常に車のコントロールを行うことから、運転自動化レベルは図表 1 の定義によれば、レベル 2 に相当すると推測されるが、トヨタ自動車では、このようなケースにとどまらず、レベル 4 以上の完全自動運転システム用の「冗長システム」（システムに障害が発生するケースに備えて、予備装置を配置・運用して

基礎研究所『研究員の眼』2018年3月29日、同「[AI・IoTの利活用の在り方](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2019年3月29日、同「[AI・IoTの利活用の在り方](#)」『ニッセイ基礎研所報』2019年Vol.63、2019年6月を参照されたい。

²⁹ 注12と同様。

³⁰ トヨタタイムズ2019年8月2日「AI界のカリスマ、トヨタの自動運転を語る」より引用。ただし、（※）は筆者による注記。

³¹ トヨタ自動車ホームページ2019年1月8日「CES 2019 トヨタ・リサーチ・インスティテュート (TRI) ギル・プラット CEO スピーチ参考抄訳」などを基に記述した。

³² アップルの創業者のスティーブ・ジョブズ氏は、2007年1月に初代iPhoneを発表する際に、「電話を再発明する(reinvent the phone)」と宣言した。

³³ ここでは、「将来の顧客を見据えて全く新しい価値を創出することにより、競争のパラダイム転換を起こし従来製品の価値を破壊してしまう抜本的なイノベーション」という意味で用いた。

³⁴ 注30と同様。このような考え方は、ギル・プラット氏がCES2019にて発表した。

³⁵ 筆者は拙稿「第4章イノベーション促進の触媒機能を果たすソーシャル・キャピタル」『ソーシャル・キャピタルと経済一効率性と「きずな」の接点を探る一』(大守隆編著) ミネルヴァ書房、2018年にて、米テスラモーターズによるEV関連の、およびトヨタ自動車によるFCV(燃料電池車)関連の、特許無償開放について、「これまで自動車産業では見られなかった動きが出てきている」と指摘した。さらに、トヨタ自動車は、2019年4月にハイブリッド車(HV)開発で培った車両電動化技術の特許実施権を無償提供することを発表した。

おくもの)としてガーディアンが搭載されるケースも想定している。ギル・プラット氏は、「ガーディアンは、トヨタの、もしくは他社製の自動運転システムを監視する手段として追加もできます。これはガーディアンのキーとなる能力です。なぜなら、昨年のCESで発表しているように、私たちは、ガーディアンを、Mobility as a Service (MaaS) 向けに開発する e-Palette に標準装備として組み込むことを計画しているからです。これにより、モビリティサービス会社は、どのような自動運転システムを使っても、トヨタのガーディアンを一種のフェイルセーフ、すなわち(※レベル4以上の)ショーファー型自動運転システム用の冗長システムとして使うことができます。つまり、ガーディアンはトヨタにとって、いわばベルトとサスペンダーのような二重のシステムであるということです」³⁶とCES2019にて述べた。

ガーディアン・フォー・オールによる先進テクノロジーの普及を含めたガーディアンの開発哲学から、可能な限り多くの人命を救うという、自動車メーカーとしての社会的責任を果たそうとする、トヨタ自動車の強い気概・高い志が感じられる。

このように、トヨタ自動車は、難易度の高い最先端のレベル4以上の完全自動運転システムであるショーファーの開発に果敢にチャレンジしつつ、出来る限り多くの人命を極力早く救うための当面の現実解として、広い走行領域に適用され得る、高度安全運転支援システムであるガーディアンの実用化・普及を急ぐという、自動運転技術の「二刀流戦略」を取っている。この二刀流戦略は、両システム間でテクノロジーの共用がなされている点で極めて合理的であるとともに、同社の高い志に裏打ちされたものであり、社会的意義の極めて高い取り組みとして高く評価されるべきだ。

6 | 自動運転の社会実装における世界展開の視点

自動運転技術を開発する企業が、全世界に向けた自動運転車やそれを活用したモビリティサービスを開発・上市することを目指すのであれば、仮想空間でのシミュレーションも駆使しつつも、基本的には、世界中で自動運転の走行試験データを取得することが必要となる。世界各国・各地で交通ルールそのものや人々の交通・運転マナーなどが異なり、走行環境が各々異なるためだ。

前述の通り、一国の中でも、フレーム問題などにより、完全自動運転の社会実装の範囲を狭い ODD から広い走行領域へ拡大していくことに大きな困難が伴うことから、その範囲を世界レベルに拡大すれば、当然フレーム問題の影響は測り知れない。従って、世界展開を目指すのであれば、少なくとも国単位(狭い国土の場合)、広い国土であれば地域単位で専用道・一般道ごとに自動運転の走行試験を徹底的に行い、異なる各々の走行環境に最適なアルゴリズムに可能な限り近付けるための「次善の努力」が必要になるだろう(「最善の策」は最適かつ完璧なアルゴリズムを作成することだが、実際は、フレーム問題のために想定外の事象は必ず残り、最適なアルゴリズムに完全一致させることはできない)。すなわち、自動運転技術の世界展開には、世界各地でのアルゴリズム開発が欠かせない。

ウェイモによる米国での自動運転車の公道試験の累積走行距離は、世界最長の1,000万マイル(約1,610万km)と地球400周分に達したという(2018年10月発表)。しかし、断トツのトップとなる試験走行距離を誇るウェイモと言えども、カリフォルニア州を中心とした米国内だけでなく、世界中の

³⁶ 注12と同様。ただし、(※)は筆者による注記。

走行映像データを収集するとなると、さらなる公道試験のために膨大な時間とコストを要することになるだろう。

筆者は、「[AI・IoTの利活用の在り方](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2019年3月29日にて、「これまでは、走行データの収集自体が極めて重要な競争領域とみなされてきたが、このように1社単独で世界中の走行データを収集することは極めて難しいため、開発スピードを上げるとともに高い安全性を確保するためにも、今後は自動運転技術の世界展開に向けては、企業連携によるデータ共有という選択肢もあり得るのではないだろうか」と指摘した。

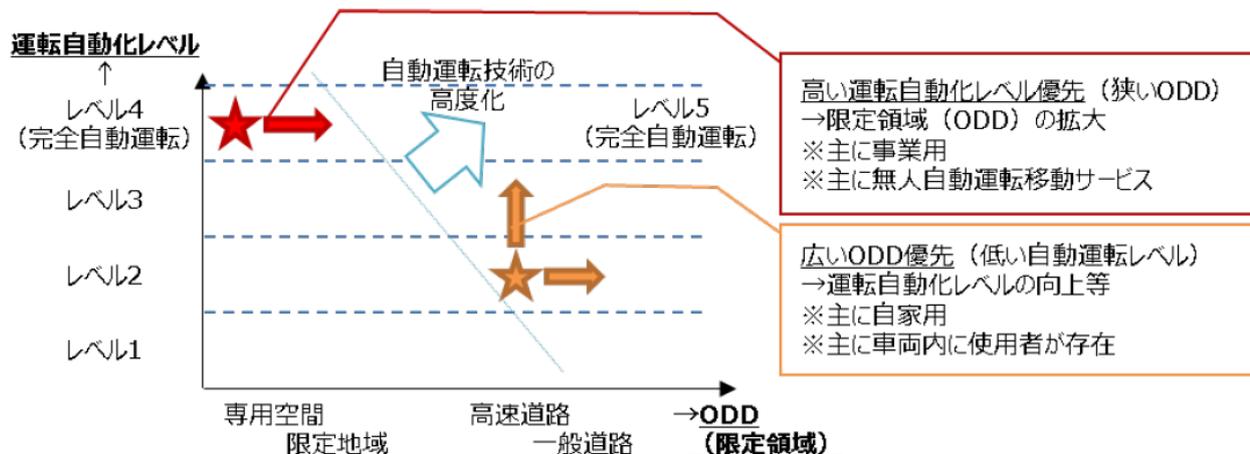
この中でウェイモは、2019年8月に、公道試験で収集した走行データを研究用途向けに大学など外部に無償開放する、と発表した。自動運転技術の開発で先頭を走る同社のこの動きが、今後、企業連携によるデータ共有・共用の動きを促すことにつながっていくかが注目される。

7 | AIのフレーム問題の視点から見た自動運転に関わる考察のまとめ

高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議「官民ITS構想・ロードマップ2019」によれば、自動運転技術の進化の方向としては、多様な交通状況での完全自動運転可能な技術の実現に向けて、大きく分けて、以下の2つのアプローチがある³⁷（図表4）。

- i 広いODD（例えば、高速道路全体など多様な交通状況）に対応することを優先し、徐々に運転自動化レベルを上げていくアプローチ：本アプローチは、主に、時間・場所等を問わずに走行することが一般的に求められる自家用車（商用を含む）における自動運転システムの戦略となる。
- ii 高い運転自動化レベルを実現することを優先して、狭いODD（狭く限定された交通状況）から開始し、その後、そのODDを徐々に拡大していくアプローチ：本アプローチは、主に、時間・場所等を制限してサービスを提供することが可能である事業用（地域公共交通、貨物輸送など）自動車での自動運転システムの活用における戦略となる。

図表4 自動運転システム実現に向けた二つのアプローチ

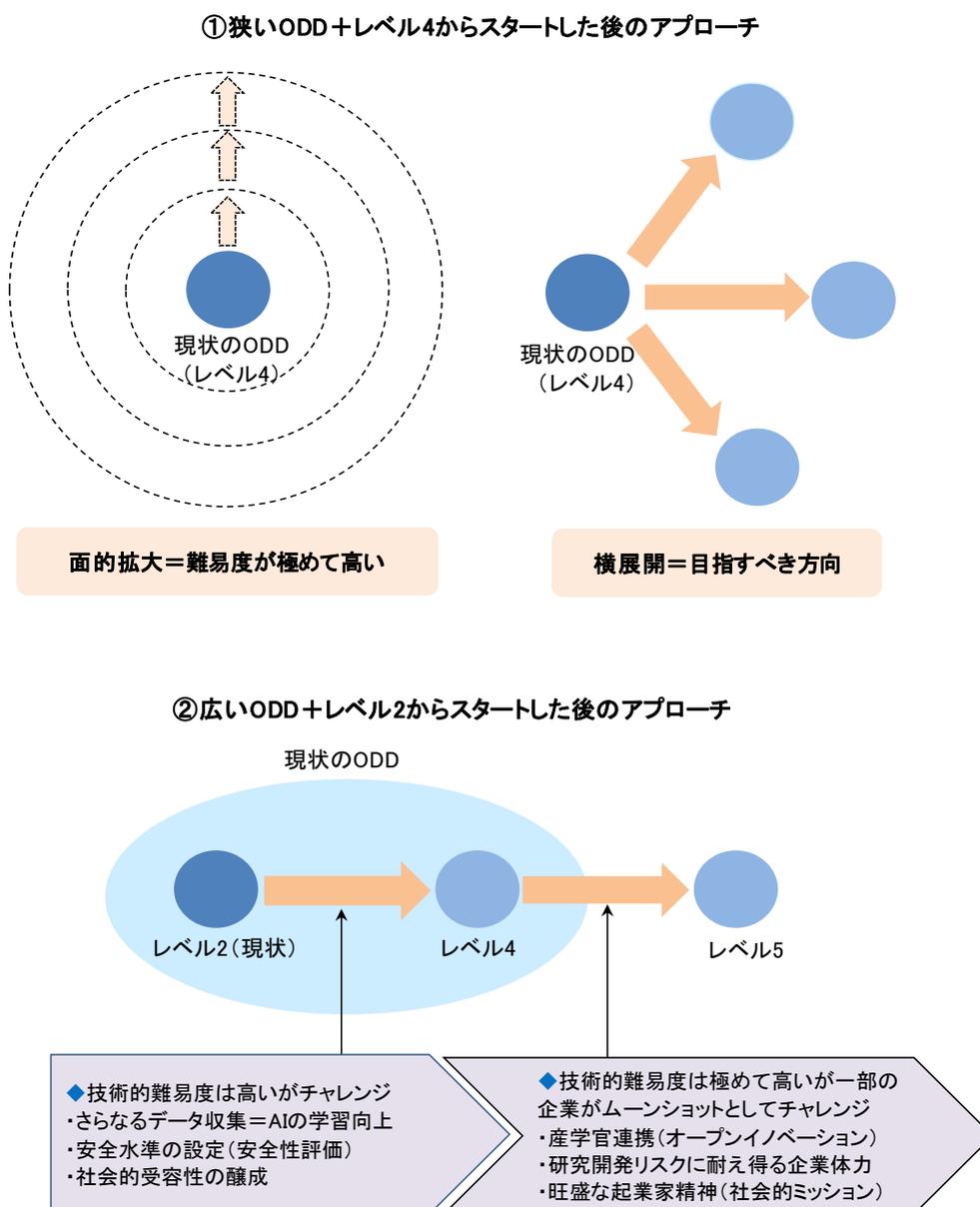


（資料）高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議「官民ITS構想・ロードマップ2019」2019年6月7日より引用。

³⁷ 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議「官民ITS構想・ロードマップ2019」2019年6月7日より引用。以下の2つのアプローチの記述も同様。

本稿でのこれまでの考察は、この2つのアプローチと整合的である。すなわち、本稿では、自動運転の社会実装においては、過疎地など地方エリアや新規開発型のスマートシティなど限定された狭いODDで、喫緊の社会課題・地域課題を解決すべく完全自動運転（レベル4）の実用化を先行し、このような狭いODDをいくつも作り出すことで横展開を図る一方で（図表5-①）、広いODDでは、トヨタ自動車のガーディアンのように、人間のドライバーと協調・融合して手動運転をサポートする高度安全運転支援システムの実用化・普及（レベル2）を急ぐことが、当面の現実解として、極めて重要であることを指摘した（図表5-②）。

図表5 自動運転システムの進化に向けたアプローチの在り方



(資料) ニッセイ基礎研究所(筆者)作成。

要約すれば、「狭い ODD での高い運転自動化レベル（レベル 4 など）」および「広い ODD での低い運転自動化レベル（レベル 2 など）」の社会実装を優先・先行させる、ということである。筆者がこのような考え方を取る理由は、「レベル 1～レベル 4 のいずれにおいても、その自動運転システムが機能すべく設計されている特有の条件である ODD が広いほど技術的な高度性が高く（※フレーム問題などを背景に技術的難易度が高く）、言い換えれば、レベル 4 であっても、狭い ODD のみで運転が自動化されるシステムであれば、技術的な高度性は相対的に低い。また、レベル 5 は、レベル 4 のうち、ODD の限定がない自動運転システムであると定義され、技術的レベルは非常に高い」³⁸からだ。

中長期的には、長期間の実走行試験・シミュレーションを続けることで、AI の学習が日々進み AI にとって想定外の事象が減少していけば、技術的難易度は高いものの、より広い ODD でより高い運転自動化レベル（レベル 4 など）が徐々に可能となっていくだろう（図表 5-②）。ただし、いくら学習を重ねても AI にとって想定外の事象がゼロにならないのがフレーム問題であるから、最終的には、自動運転の安全性評価（自動運転による事故率がどれくらいの水準であれば安全とみなすのかという、安全水準の設定）と社会的受容性の醸成の問題に収れんしていく、と考えられる。また、究極の自動運転であるレベル 5 は、技術的難易度が極めて高いものの、トヨタ自動車など一部の企業が産学官の叡智を結集したオープンイノベーションも活用しながら、ムーンショットとして果敢にチャレンジし続けることが望まれる。筆者は、ムーンショット型研究開発のリスクに耐え得るだけの強い企業体力を持ち、かつ社会課題解決という社会的ミッションの実現に向けてハードルの高い研究開発に挑み、それをやり抜く気概を持つ起業家精神旺盛な企業が、最先端技術分野に関わるイノベーションを担い主導することは、我が国の国レベルでの技術ポートフォリオ上、極めて重要である、と考える。

4— おわりに～AI の社会実装の在り方へのインプリケーション

本稿では、AI の社会実装における最大のチャレンジと考えられる、自動運転を例として、AI 研究の最大の難問と言われる、フレーム問題について考えてきた。

自動運転に関わる考察から得られた、AI の社会実装の在り方へのインプリケーションは、「フレーム問題から逃れられない現在の特化型 AI は、不完全で使えない」ということではなく、「人間は、AI の過小評価や過大評価・過信を避け、現状の AI の実力・強味や限界を十分に理解した上で、フレーム問題を回避し AI を上手に使いこなす工夫を凝らし、社会課題解決のツールとして、積極的に利活用すべきである」ということだ。

筆者は、企業による AI 利活用の「目的（アウトカム）」は、新技術・新事業の創出を中心とする「プロダクト・イノベーション」や業務プロセスの効率化・改革を中心とする「プロセス・イノベーション」につなげることであり、さらにこのイノベーションを通じて社会を良くすること（社会課題を解決すること）、すなわち「社会的価値（social value）」³⁹を創出することは、AI 利活用の「ソーシャ

³⁸ 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議「官民 ITS 構想・ロードマップ 2019」2019 年 6 月 7 日より引用。ただし、（※ ）は筆者による注記。

³⁹ 企業の存在意義や社会的責任を社会的価値の創出と捉える考え方については、拙稿「[CSR（企業の社会的責任）再考](#)」『ニッセイ基礎研 REPORT』2009 年 12 月号、同「[震災復興で問われる CSR（企業の社会的責任）](#)」ニッセイ基礎研究所『研究員の

ルインパクト（社会全体への波及効果）」と捉えるべきだ、と考えている⁴⁰。AI の社会実装を、最終的には人々のライフスタイルやワークスタイルを豊かにし、人々の快適性・利便性や心身の健康・活力、安全・安心など社会生活の質、すなわち QOL (Quality Of Life) を豊かにすることに貢献させるべきなのだ。

複数のタスクをこなせない現在の特化型 AI は、フレーム問題を回避すべく、閉じた限定的シーンで特定のタスクを担わせると、非常に大きな成果をもたらす。逆に、想定外の事象が無限に起こり得る複雑な現実世界では、フレーム問題により力を発揮できなくなる可能性が高まってしまう。

AI の開発・実装においては、AI に関わる科学者・開発者や経営者など人間が、特化型 AI の性能を最大限に引き出すべく、AI が解くべき問題および AI を利活用する環境・領域をしっかりと設定して「フレームをはめる」ことこそが最も重要である、と言っても過言ではない。

本稿で示した AI の社会実装の在り方へのインプリケーションを踏まえて、AI の性能を最大限に引き出す利活用への積極的な取り組みが、今後本格化することを期待したい。

眼』2011年5月13日、同「[CSRとCRE戦略](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2015年3月31日、同「[最近の企業不祥事を考える](#)」ニッセイ基礎研究所『研究員の眼』2015年12月28日、同「[イノベーションの社会的重要性](#)」ニッセイ基礎研究所『研究員の眼』2018年8月15日、同「[企業不動産 \(CRE\) の意味合い](#)」ニッセイ基礎研究所『研究員の眼』2019年3月4日、同「[社会的ミッション起点のCSR経営のすすめ](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2019年3月25日を参照されたい。

⁴⁰ AI 利活用のアウトカムやソーシャルインパクトに関わる筆者のこのような考え方については、拙稿「[AIの産業・社会利用に向けて](#)」ニッセイ基礎研究所『研究員の眼』2018年3月29日、同「[イノベーションの社会的重要性](#)」ニッセイ基礎研究所『研究員の眼』2018年8月15日、同「[AI・IoTの利活用の在り方](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2019年3月29日、同「[AI・IoTの利活用の在り方](#)」『ニッセイ基礎研所報』2019年Vol. 63、2019年6月を参照されたい。

<補論>AIのフレーム問題について

1 | AIのフレーム問題の定義

AIのフレーム問題は、AI研究者のジョン・マッカーシー（J. McCarthy）とパトリック・ヘイズ（P. J. Hayes）によって、1969年に提唱されたものである。「McCarthyらが最初に示した例は、（電話を所有している）人間Pが電話帳で人間Qの電話番号を調べ、電話をかけて、会話をする、という状況設定であった。計算機上に古典的な論理でこのような行為を記述しようとすると、『ある人が電話を所有していれば、その人が電話帳で誰かの電話番号を調べた後でも、まだその人は電話を所有している』というような、人間にとっては極めて自明な条件を列挙してやらねばならない。このような条件をいちいち記述してはその量が膨大になってしまって手に負えなくなる。これがフレーム問題である。より一般的に言えば、彼らのオリジナルな定義では、『ある行為を論理で計算機上に記述しようとしたとき、その行為によって変化しない事象をいちいち変化しないと明示的に記述するのは煩わしい』ということがフレーム問題である。ここで『手に負えない』とか『煩わしい』とあるのは、情報処理における計算の量が空間的に多すぎることである。比喩を用いて説明するならば、ある計算問題を黒板を使って解こうとするときに、解くのにとてつもなく広い黒板が必要になって困る、ということである」（松原（1991））。

「哲学者のダニエル・デネット（※D. C. Dennett）は、あらゆる状況を考えすぎて時間内に問題を解決できないロボットのたとえ話を通して、この問題（※フレーム問題）を易しく説明している」⁴¹（浅川・江間・工藤・巢籠・瀬谷・松井・松尾（2018））。デネットが84年の論文⁴²で示した非常に有名な事例は、「洞窟の中にロボット用の予備のバッテリーがあるが、その上に時限爆弾が仕掛けてある状況の中で、AI搭載ロボットが洞窟の中からバッテリーを取って来るように指示された」というものだ。

フレーム問題のオリジナルの定義は、前述の通りだが、その後の研究者の間で、フレーム問題についての解釈・捉え方にはコンセンサスはない、との見方もある。例えば、森岡（2019）は、『フレーム問題』とはいったいどういう問題なのかについて、専門家のあいだに意見の一致があるとは言えない。しかし大きく捉えれば、人間なら誰でも知っている『暗黙知』をいかにして人工知能に覚えさせることができるのか、という点にかかわる難問だとみなしてよいだろう」と述べている。

一方、筆者は、フレーム問題を「世の中で起こり得るすべての事象から、今行うべき分析・判断に必要な情報のみを『枠（フレーム）』で囲うように、選び出すことがAIには非常に難しいという問題」と定義した。筆者がこの定義を作成する上で参考にした先行研究は、「フレーム問題とは、人工知能が問題解決を行なおうとするときに、何が自身にとって重要なファクターで、何が自身にとって無視してもよいファクターであるのかを、自分自身で自律的に判断することができないという問題である。これは人工知能型ロボットを現実世界で実際に動かそうとするときに直面してしまう難問である」（森岡（2019））、AIには、『今しようとしていることに関係のあることがらだけを選び出すことが、実は

41 （※）は筆者による注記。

42 D・デネット、信原幸弘（訳）「コグニティブ・ホイールー人工知能におけるフレーム問題」青土社『現代思想』1987年15巻5号、Daniel C. Dennett “Cognitive Wheels: The Frame Problem of AI.” In Christopher Hookway, ed., *Minds, Machines and Evolution: Philosophical Studies*, Cambridge: Cambridge University Press (1984)

非常に難しい』という問題をフレーム問題という」(浅川ら (2018))、「フレーム問題の広い意味⁴³とは、『膨大な情報の中から(記述するにしろ処理するにしろ)必要なものをどうしたらただちに取り出せるか』、ということである」(松原 (1991))、などである。

また、筆者は、「フレーム問題には、『AI のプログラムの中に、想定外の事象を含めて、世の中で無限に起こり得るすべての事象を原理的に記述し切れない(=AI に覚え込ませることはできない)』という、構造的な問題も含まれる」と述べた。「考慮すべき事象が有限でもそれが膨大な量であれば、AI が持つ有限の計算リソースでは対応し切れない」という視点に加え、「考慮すべき事象が無限にあるために、そもそもすべての事象を考慮し切れない」というこの視点では、先行研究として、「フレーム問題には、『無理すればなんとか記述しきれはるけれども、その量が多すぎる』という側面と、『そもそも原理的に記述しきれない』という側面とが存在する。最初の頃はもっぱら前者だけが議論になっていたが、後になって後者も議論されるようになった」(松原 (1991))、「これ(※フレーム問題)は、コンピュータのプログラムの中に、世の中で起こりうる現象をすべてあらかじめ記述して準備しておくことはできないという構造的な問題として知られている。また、膨大な記述が仮にできたとしても、相互の関係性を多重に予測することにより、無限の場面を想定しなければならなくなり、結果的に自車は身動きが取れなくなってしまう」⁴⁴ (高橋 (2018))、などを参考とした。

2 | AI のフレーム問題は未解決

フレーム問題はAI 研究の古典だが、未だに未解決である、とされる。例えば、森岡 (2019) は、「ボーデン⁴⁵も 2016 年の段階で『悪名高いフレーム問題が解決されたとするのは非常にミスリーディングである』と書いており、フレーム問題は未解決であるというのが現在でも少なくない専門家の意見だと考えられる」と述べている。また、浅川ら (2018) は、フレーム問題について「未だに本質的な解決はされていない」と述べている。

松原 (1991) は、「フレーム問題は人工知能で提唱された概念で、一言で言えば『有限の情報処理能力しか持たない推論主体にとって膨大な情報を扱いきれるか』というものである。フレーム問題は情報の計算量に関する問題であり、有限の情報処理能力しか持たない推論主体であるところの人間にも計算機にもフレーム問題は解けない」と指摘するとともに、「計算量には記述(空間)の量と並んで処理(時間)の量がある。McCarthy らのいうフレーム問題は、そのうちの記述の量を減らすことのみにもっぱら注目していた。処理の量も込みにして考えれば、フレーム公理⁴⁶による工夫は『記述+処理』の全体としての計算量の改善には結び付いていないのである。筆者はこのことを明らかにした上で、フレーム問題の定義を記述のみでなく処理込みにまで広げるべきだという立場を提唱した⁴⁷。そのように広くフレーム問題をとらえると、どう工夫をしようとしても計算機には原理的に解決できないことにな

⁴³ 次節の注 47 にて言及される「一般化フレーム問題」を指す。

⁴⁴ (※) は筆者による注記。この文献は自動運転に関わる論文であるため、「自車は」となっているが、これは「AI を搭載した自動運転車」と言い換えてもよいだろう。

⁴⁵ マーガレット・ボーデン (M. A. Boden) は、AI や認知科学の研究者。

⁴⁶ 「特に変化すると断わらない限りは変化しないと見なす」という仮定を指す。

⁴⁷ 松原は、提唱したこの考え方を McCarthy らのオリジナルのフレーム問題と区別して「一般化フレーム問題」と呼んでいる。

る。フレーム問題を広くとらえ直すことによって、もともとは計算機固有と考えられていた問題が、実は有限の情報処理能力しか持たない推論主体に共通する問題であることがわかってきた」と述べている。

3 | 人間とフレーム問題

「フレーム問題は情報の計算量に関する問題であり、有限の情報処理能力しか持たない推論主体であるところの人間にも計算機にもフレーム問題は解けない」（松原（1991））。

人間も想定外の事象に遭遇して戸惑うことはよくあることだが、個人差は勿論あるものの、人間は試行錯誤を繰り返して、それに対応しようとする。AIと同様に人間にも、フレーム問題は本質的に解決できないにもかかわらず、想定外の事象が無限に起こり得る極めて複雑な現実世界の中で日常生活を営む人間が、フレーム問題に何とか対応し回避できているように見えるのはなぜか。松原（1991）は、「このことを筆者は『人間はフレーム問題を疑似解決している』という言い方をする。常に情報処理の計算量の爆発に悩まされている（現在の）計算機とは大違いである。人間はふつう有限の大きさの枠を情報に対して囲っている。ほとんどの推論はこの枠の中の情報を参照することで済むようになっていく。枠の中だけを情報処理の対象としていけばフレーム問題を解決しなければならないような事態には陥らない。それでも場合によっては枠の中の情報だけではうまくいかないことがある。もしも枠の外の情報を参照することになればフレーム問題に直面し、計算量の爆発に苦しんでしまう。枠がかなりうまくできていることが、人間がめったにフレーム問題に直面しないですむ理由である。枠の中に求める情報が存在しないときは、枠の中から最もましな情報を引き出してその代わりとするか、枠の外に出てフレーム問題に悩みながら求める情報を探るか、のいずれかを選択することになる。人間は一度囲んでしまった枠の外を探すことはめったにないように思える。枠の中から無理やり引き出した情報が間違っているというのが、人間がときどき誤りを犯すことの原因のひとつである。人間は、そのような犠牲を払った代償として、日常はフレーム問題に悩まずにすむという柔軟性・経済性を得ていることになる」と述べている。

つまり、人間は、一定の「フレーム」の中で推論することで、フレーム問題を回避しているのである。この点は、AIの社会実装にも非常に重要なヒントとなる。前述の通り、筆者は「AIが解くべき問題およびAIを利活用する環境・領域をしっかりと設定して『フレームをはめる』人間の役割が、最も重要である」と指摘した。

<参考文献>

(※弊社媒体の筆者の論考は、弊社ホームページの筆者ページ「[百嶋 徹のレポート](#)」を参照されたい)

- 浅川伸一・江間有沙・工藤郁子・巢籠悠輔・瀬谷啓介・松井孝之・松尾豊『深層学習教科書 ディープラーニング G 検定 (ジェネラリスト) 公式テキスト』(日本ディープラーニング協会監修) 翔泳社、2018年
- 経済産業省製造産業局「自動運転を巡る経済産業省の取組」2018年2月16日
- 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議「官民 ITS 構想・ロードマップ2019」2019年6月7日
- 国土交通省自動車局「自動運転車の安全技術ガイドライン」2018年9月
- 産業技術総合研究所ニュース2017年12月13日「ラストマイル自動走行の実証評価(輪島市)を開始」
- 高橋宏「安全・安心に利用できる自動運転車両の課題」『湘南工科大学紀要』Vol. 52、No. 1、2018年
- D・デネット、信原幸弘(訳)「コグニティブ・ホイールー人工知能におけるフレーム問題ー」青土社『現代思想』1987年15巻5号、Daniel C. Dennett “Cognitive Wheels: The Frame Problem of AI.” In Christopher Hookway, ed., *Minds, Machines and Evolution: Philosophical Studies*, Cambridge: Cambridge University Press (1984)
- トヨタタイムズ2019年8月2日「AI界のカリスマ、トヨタの自動運転を語る」
- 豊田市・報道発表資料2019年8月29日「低速自動運転車両の事故の推定原因について」
- トヨタ自動車HP2017年1月5日「トヨタ・リサーチ・インスティテュート ギル・プラットCEOスピーチ参考抄訳 (CES プレスカンファレンス)」
- 同2019年1月8日「CES 2019 トヨタ・リサーチ・インスティテュート (TRI) ギル・プラットCEOスピーチ参考抄訳」
- 内閣官房IT総合戦略室「自動運転に係る制度整備大綱(概要)」2018年4月17日
- 内閣官房日本経済再生総合事務局「国の実施する公道実証プロジェクトの方向性と共有すべきデータについて」自動走行に係る官民協議会(第2回)2017年9月28日
- 内閣府ホームページ「ムーンショット型研究開発制度」
- 日刊工業新聞2019年2月27日「自動運転、乗り越えるべき壁(上)レアケースの収集」
- 日刊工業新聞ニュースイッチ2018年5月6日「全国で実証進む自動運転、実用化へ立ちはだかる壁」
- 日本経済新聞 電子版2019年7月4日「ホンダ、『レベル3』を来年実現 高速渋滞時に」
- ビッグイシュー・オンライン2018年10月22日「自動運転車の実用化に向けた技術的・倫理的・社会的課題とは」
- 百嶋徹「[CSR\(企業の社会的責任\)再考](#)」『ニッセイ基礎研 REPORT』2009年12月号
- 同「[震災復興で問われるCSR\(企業の社会的責任\)](#)」ニッセイ基礎研究所『研究員の眼』2011年5月13日
- 同「[CSRとCRE戦略](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2015年3月31日
- 同「[最近の企業不祥事を考える](#)」ニッセイ基礎研究所『研究員の眼』2015年12月28日
- 同「[製造業を支える高度部材産業の国際競争力強化に向けて\(後編\)](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2017年3月31日
- 同「[AIの産業・社会利用に向けて](#)」ニッセイ基礎研究所『研究員の眼』2018年3月29日
- 同「[イノベーションの社会的重要性](#)」ニッセイ基礎研究所『研究員の眼』2018年8月15日

- 同「第4章イノベーション促進の触媒機能を果たすソーシャル・キャピタル」『ソーシャル・キャピタルと経済—効率性と「きずな」の接点を探る—』（大守隆編著）ミネルヴァ書房、2018年
- 同「[企業不動産（CRE）の意味合い](#)」ニッセイ基礎研究所『研究員の眼』2019年3月4日
- 同「[社会的ミッション起点のCSR経営のすすめ](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2019年3月25日
- 同「[AI・IoTの利活用の在り方](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2019年3月29日
- 同「寄稿 ハンドブック発刊によせて／地域活性化に向けた不動産の利活用」国土交通省土地・建設産業局『企業による不動産の利活用ハンドブック』2019年5月24日
- 同「[AI・IoTの利活用の在り方](#)」『ニッセイ基礎研所報』2019年Vol.63、2019年6月
- 同「[地域活性化に向けた不動産の利活用—国土交通省『企業による不動産の利活用ハンドブック』へ寄稿](#)」ニッセイ基礎研究所『基礎研レポート』2019年7月11日
- 同「エコノミストリポート／カナダ、中国でスマートシティー グーグル系も街づくりに本格参入 データ連携基盤の構築がカギ」毎日新聞出版『週刊エコノミスト』2019年10月29日号
- 松原仁「暗黙知におけるフレーム問題」日本科学哲学会『科学哲学』1991年24巻
- 森岡正博「人工知能と現代哲学：ハイデガー・ヨーナス・粘菌」日本哲学会『哲学』第70号、2019年4月
- WIRED 2019年4月11日「完全自動運転の到来は、まだ先になる？ フォードCEOの発言に見る実現までの長い道のり」
- 同 2019年6月10日「自動運転は、いかに実現するのか：現状分析から見えた『6つの分野』での導入シナリオ」