みずほ情報総研レポート

vol.20
2020

CONTENTS

社会動向レポート

◆人間拡張：Augmented Human
～人間の能力を拡張する期待の技術～

◆我が国における自動車の外部性を考慮した
走行距離課税の検討
―中長期的な自動車関係諸税の見直しに向けて―

◆CO_2有効利用（CCU）の国内外の動向

◆職場における化学物質管理に関する
国内外の動向

◆認知症高齢者の経済活動への対策と
任意後見の活用について

技術動向レポート

◆都市の動きを丸ごと予測できるか？
データとシミュレーションの活用

◆UPACS を活用したターボ機械分野向け
流体解析システム開発

MIZUHO　みずほ情報総研株式会社

みずほ情報総研レポートとは

みずほ情報総研株式会社の職員が、企業経営分野・公共政策分野・社会科学分野・環境分野・情報通信分野・工学分野等のトピックスを専門的見地から採り上げ、論述したレポート集です。

※「みずほ情報総研レポート」はweb上でも閲覧することができます。
https://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/mhir/index.html

MIZUHO

社会動向レポート

人間拡張：Augmented Human …… 2
～人間の能力を拡張する期待の技術～
経営・IT コンサルティング部　川瀬　将義

我が国における自動車の外部性を考慮した走行距離課税の検討…… 12
―中長期的な自動車関係諸税の見直しに向けて―
環境エネルギー第1部　チーフコンサルタント　川村　淳貴

CO_2有効利用（CCU）の国内外の動向 …… 28
グローバルイノベーション＆エネルギー部　エネルギービジネスチーム　コンサルタント　野原　珠華

職場における化学物質管理に関する国内外の動向…… 38
環境エネルギー第2部　コンサルタント　後藤　嘉孝

認知症高齢者の経済活動への対策と任意後見の活用について…… 47
社会政策コンサルティング部　チーフコンサルタント　高橋　正樹

技術動向レポート

都市の動きを丸ごと予測できるか？　データとシミュレーションの活用…… 54
サイエンスソリューション部　課長　小坂部　和也

UPACS を活用したターボ機械分野向け流体解析システム開発 …… 64
情報通信研究部　シニアコンサルタント　松村　洋祐

社会動向レポート

人間拡張：Augmented Human

～人間の能力を拡張する期待の技術～

経営・IT コンサルティング部
川瀬　将義

1. はじめに

近年、「人間拡張（Augmented Human、オーグメンテッド・ヒューマン）」という言葉を耳にする機会が増えているのではないだろうか。人間拡張は一言で表すと「人間の能力を補完・向上する、あるいは新たに獲得するための技術」であり、様々な社会課題を解決する効果をもたらすと期待が集まっている。人間拡張の代表的なアプリケーションであるパワーアシストスーツ[(1)]（人体の動きをサポートする装着型の装置）は、運動能力を向上することで荷物を運搬する際の負担を軽減し、作業時間を短縮できるなど、一人一人の生産性向上や労働力不足を解消する効果が期待されている。また、けがや老化などにより喪失／低下した能力を補うことで、自立した生活の支援、それによる医療・介護費を低減する効果も期待される。

人間拡張の発展を支える要素技術には、ロボット、センサ、通信、AI[(2)]、VR[(3)]／AR[(4)]／MR[(5)]、ハプティクス[(6)]（振動や力などで人間の触覚を疑似的に再現する技術）などが挙げられる。これらの要素技術の組み合わせにより、従来よりも人間と一体化したデバイスが作製できるようになった。例えば、義手／義足やロボットアームなどは、ロボット、センサ、通信、ハプティクスを組み合わせることで、搭載したセンサにより取得した触覚情報を身体に伝達・体感させ、あたかも自身の手や腕のように扱えるデバイスになりつつある。特に、ハプティクスの技術革新は、人間に「デバイスとの一体感」を感じさせることに大きく貢献している。デバイスの存在の煩わしさを軽減させ、人間がデバイスの機能を自身の能力のように扱うことを可能とするハプティクスは、人間拡張の発展において重要な要素技術となっている。

一方、人間拡張の活用場面は「人間拡張がもたらす効果」に応じて様々である。また、その効果は人間拡張のアプリケーションや組み合わせる要素技術に応じて多岐にわたり、画一的に示すことは難しい。しかし、効果の整理・類型化を行うことは、人間拡張の適用範囲や活用方法の検討を可能とするため重要であると考える。

本稿では、最初に人間拡張を定義・分類し、人間拡張の全体像を把握する。続いて、「デバイスとの一体感」を向上する取組みを紹介し、人間拡張を実現する技術の現状について論じる。その後、「人間拡張がもたらす効果」を整理・類型化し、今後の人間拡張の適用範囲や活用方法の可能性、人間拡張への期待について述べる。

2. 人間拡張の定義・分類

（1）人間拡張の定義

一般に、人間拡張には明確に確立された定義はなく、文脈に応じて様々な技術が該当する。東京大学の暦本純一教授は、人間拡張を「人間

の能力をテクノロジーによって自由に増強・拡張させる技術」と説明し、人間拡張の究極の姿を「人機一体」としている[7]。「人機一体」は人間と機械の一体化のことであり、テクノロジーを活用した機械が人間と一体化し、能力を自由に増強・拡張することが人間拡張と言えよう。

一方、国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研と称する。）の人間拡張研究センターは「人間拡張とは、人に寄り添い人の能力を高めるシステム」と説明している[8]。「人に寄り添う」とは人間に違和感を覚えさせないことを含んでおり、人間に一体感を感じさせるシステムにより人間の能力を高めることが人間拡張の1つの重要な要素と言えよう。

このように人間拡張の定義は様々な観点で述べられているが、共通して指摘されているのは、「人間とデバイスの一体化」、「人間の能力の拡張」の2つである。ここで言う「デバイス」とは、先述した人間拡張の要素技術（ロボット、センサ、通信など）を組み合わせたテクノロジーやシステムのことである。現状のデバイスは機械的なものが中心であるが、将来的には細胞やタンパク質などを材料として用い、より人間との一体化を促進する人間拡張も検討されており、機械的なデバイスに限定されるわけではない点も指摘しておく。また、ここで言う「能力の拡張」は、「人間拡張がもたらす効果」の観点から、「能力を補完・向上する、あるいは新たに獲得する」と整理することが出来る（詳細は4章を参照）。

以上をふまえ、本稿では人間拡張を「デバイスが人間と一体化し、人間の能力を補完・向上するための技術、あるいは新たに獲得するための技術」と定義した。

(2)人間拡張の分類

人間拡張において「人間の能力を補完・向上する、あるいは新たに獲得する」方法としては2つのアプローチがある。1つは人間の器官（運動器、感覚器など）が持つ能力を拡張する方法で、本稿では「身体の拡張」とする。もう1つは人間を物理的な身体から解放し、新たな身体（ロボットなど）との感覚共有や操作を行う方法であり、「存在の拡張」とする。

図表1に、「身体の拡張」と「存在の拡張」を整理した結果を示す。

①　身体の拡張

身体の拡張は人間の器官に応じて分類できる。現状、人間拡張の対象となる器官は、1）運動器、2）感覚器、3）脳（神経系）、がほとんどである。呼吸器、循環器、消化器などの能力を拡張するデバイスも存在するが、能力が喪失／低下した器官を代替する医療機器としての側面が強いため、図表1では4）その他に分類している。

1）運動器

運動器はロボットに例えると、エネルギーを物理的運動に変換するアクチュエータに相当し、運動器の拡張とは人間の運動能力を補完・向上、あるいは新たに獲得する技術である。アプリケーションとしてはパワーアシストスーツ、義手／義足などがある。パワーアシストスーツは重量物を運搬する際に腰の負担を軽減するなど力仕事の支援を主な目的とし、介護や物流などの分野で活用されている。義手／義足は失った四肢を代替する人工四肢であり、従来は力加減の調節や意図した動作を行うための長期間のリハビリや訓練が必要であった。しかし、ハプティクスや筋電位測定・分析技術などの研究開発の進展により、義手／義足が触れた感覚を触覚として身体に伝達することなどが可能となりつつあり、利用者の利便性やQOL（Quality of Life）の向上が期待されている。

図表1 人間拡張の分類

大分類	小分類	概要	アプリケーション例
身体の拡張 （人間の能力の拡張）	運動器	人間の運動能力を補完・向上、あるいは新たに獲得する技術。筋力低下の補完や運搬能力の向上などが含まれる。	・義手／義足 ・パワーアシストスーツ ・第3の腕
	感覚器	人間の五感の能力を補完・向上、あるいは新たに獲得する技術。現状では視覚、聴覚が主な対象であり、視力や聴力の補完などが含まれる。	・メガネ／コンタクトレンズ ・スマートグラス ・補聴器
	脳	人間の脳の能力（学習能力、記憶力、認知能力、他器官の制御能力など）を補完・向上、あるいは新たに獲得する技術。学習効率の向上や記憶障害の補完などが含まれる。	・脳情報モニタリング学習 ・記憶チップ
	その他	呼吸器、循環器、消化器などの器官の能力を補完・向上、あるいは新たに獲得する技術。現状では、能力が喪失／低下した器官を代替する医療機器としての側面が強いため、一般に人間拡張として話題になることは少ない。	・超音波無発声音声装置 ・人工心臓 ・人工呼吸器
存在の拡張 （物理的な身体からの拡張）	現実の身体	人間の分身であるロボット（アバターロボット）との感覚共有・遠隔操作により、遠隔地で活動する身体を獲得できる技術。	・遠隔医療ロボット ・アバターロボット
	仮想の身体	デジタル空間における分身体（デジタルアバター）の感覚共有（仮想の感覚を構築して体感）・操作により、仮想空間で活動する身体を獲得できる技術。	・デジタルアバター
	他人の身体	他者の身体感覚や五感などを、自身の感覚として体感できるようにする技術。	・体験共有

（資料）みずほ情報総研作成

2）感覚器

感覚器はロボットに例えるとセンサに相当し、感覚器の拡張とは人間の五感を補完・向上する、あるいは新たな能力を獲得する技術のことである。

現状、人間拡張が検討されている主な対象は視覚器及び聴覚器である。視覚器を拡張するアプリケーションにはメガネ、コンタクトレンズ、スマートグラス、AR／MRグラスなどが挙げられる。スマートグラス、AR／MRグラスはメガネ型の機器で、メガネのレンズ部分がディスプレイを兼ねており、現実と重ねてデジタル情報を表示できる。周辺環境を認識するセンサがないものをスマートグラス、センサがあるものをAR／MRグラスと呼ぶ。スマートグラスは機能がデジタル情報の表示のみに制限されている代わりに軽量という利点がある。一方、AR／MRグラスはある程度の大きさ・重量があるものの、現実の世界で見た物体を識別し、その上に情報を重ねて表示できるなど、より複雑な機能を有している。

聴覚器を拡張するアプリケーションには補聴器や人工内耳などの医療機器が挙げられる。なお、スマートグラスの中には音声ガイド機能を搭載した機種も存在しており、これは聴

覚器を拡張したアプリケーションと言える。

触覚器、嗅覚器、味覚器の拡張は②存在の拡張における感覚共有(遠隔地でにおいを感じるなど)のための要素技術としての側面が強い。

3)脳(神経系)

脳の能力に関しては解明されていない部分が多く、かつ、脳波や脳血流変化などの脳情報の取得には大掛かりな装置が必要な場合もあり、技術的なブレイクスルーが望まれている。

実際に活用されつつあるアプリケーションとしては、脳情報モニタリング学習／訓練が挙げられる。これは、脳情報を取得してAIで分析することで、集中や記憶など、自身の半ば無意識的な状態を把握し、学習や訓練を効率化するものである。自身の集中具合や学習の効率を記録できる「Effective Learner [9](株式会社ニューロスカイ)」や、集中力を高めるゲーム「GLOWMASTER [10](Playto Holdings Inc.)」など、実際に製品として販売されているものもある。

脳の機能である認知能力、学習能力、記憶力、他器官の制御力などの拡張に向けた研究開発も進められており、今後の展開に注目したい。

4)その他

呼吸器、循環器、消化器などの能力を拡張する技術も存在する。よく知られたものとしては、医療機器である人工心臓や人工呼吸器などが挙げられる。

医療機器以外では、ソニーコンピュータサイエンス研究所と東京大学暦本研究室が共同開発した、無発声音声装置「SottoVoce [11]」が挙げられる。これは発声せずに話した際の口腔内の動きを顎の下に取り付けた超音波イメージングプローブ[12]で計測し、AIで解析して発声内容を復元するものである。

②　存在の拡張

存在の拡張は感覚共有・遠隔操作を行う対象に応じて分類できる。現状では1)機械の身体(ロボット)が主流であるが、将来的には2)仮想の身体(デジタル空間)、3)他人の身体も想定されている。1)機械の身体と2)仮想の身体を合わせて、テレイグジスタンスやテレプレゼンスと呼ばれている。存在の拡張では人間の五感の多くまたは全ての再現が期待されているが、現状では視聴覚、触覚が主な対象であり、嗅覚、味覚の再現は研究開発がされているものの実用化にはまだ時間がかかると思われる。

1)機械の身体

ここで言う機械の身体は、人間の分身体であるロボット(アバターロボット)のことであり、アバターロボットとの感覚共有・遠隔操作により、人間が遠隔地に存在しているかのように存在を拡張する技術である。アバターロボットは人型を中心に開発が進められているが、人型以外のロボットもあり得る。ロボット技術の進展に加え、視聴覚がAR／MR、触覚がハプティクスにより再現できるようになったほか、5Gにより大容量・低遅延の通信が可能となったことで、近年注目が高まっている。また、COVID-19(新型コロナウィルス感染症)の感染拡大に伴い、人間同士が接触しない活動を可能にする技術として注目がさらに高まっている。アバターロボットはテレワーク、テレショッピングなどの遠隔体験や、危険作業の代替などへの活用が期待されている。また、通常時は人間が介在せずに自動のロボットとして動作するが、必要に応じて人間が操作することで、一人で複数のアバターロボットを操作することも可能となる。これは製造現場や接客など、作業を完全にはルーチン化できない場面での活用が期待されている。期待の大きいアバターロボットであるが、現状ではコストが課題であり、普及のためには低価格

化が望まれている。

2)仮想の身体

ここで言う仮想の身体は、デジタル空間における分身体(デジタルアバター)のことであり、デジタルアバターとの感覚共有(仮想の感覚を構築して体感)・操作することにより、人間が仮想空間に存在しているかのように存在を拡張する技術である。いわゆるVRの発展形であるが、現状では視聴覚に加え、一部の触覚を体感できるに留まっている。

3)他人の身体

他人の身体感覚や五感などを自身の感覚として体感できるようにする技術である。熟練者の感覚を自身が経験することで学習・訓練効率を向上させるなどの活用が期待されている。事例として、他人の視界を体感できる「JackIn Head[(13)]」がソニーコンピュータサイエンス研究所と東京大学 暦本研究室により発表されており、スポーツ選手の視点を体験できる利用法などが提案されている。

3. 人間拡張を実現する技術の現状 ～デバイスとの一体感～

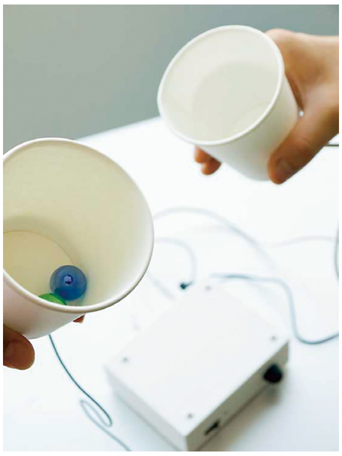
本章では「デバイスとの一体感」を向上する最近の取組みを紹介する。「デバイスとの一体感」は、本来の人間の能力を妨げない、あるいは人間の能力を妨げていないかのように錯覚させることで向上できる。例えば、VRでは視界を全て映像に置き換えることで、映像を実際の視覚と錯覚させることで一体感を演出している。

デバイスが人間と一体化する場合、触覚はほとんど必然的に生じる感覚である。先述の例においても、VRは視覚を妨げてはいないものの、デバイス(ヘッドセット)を装着することによる違和感(触覚)は存在する。このような違和感を可能な限り解消する、もしくは触覚を再現・利用する技術として、本稿ではハプティクスに着目し、「デバイスとの一体感」を向上する研究開発事例を紹介する。

ハプティクスは振動や力などで人間の触覚を疑似的に再現する技術であり、ゲーム機のコントローラーや、ディスプレイのタッチ感覚のフィードバックなどに使われている。触覚を情報として記録・伝達することも可能となっており、動画配信に触覚情報をコンテンツとして搭載・伝達する研究も進められている。図表2は「TECHTILE toolkit[(14)]」と呼ばれる触覚の取得・記録・編集・伝達・再現が行えるツールで、一方の紙コップで生じた玉が転がる感触を取得・記録し、もう一方の紙コップに張り付けられたアクチュエータでその感触を伝達・再現している。また、ハプティクスを応用して、ロボットが知覚した触覚を人間にそのまま伝達・再現する技術も開発されている。

このように、触覚を伝達・再現する技術は研究開発が進んできているが、人間が煩わしさを感じずに装着できるデバイスとするためには、まだ課題が残っている。現在のアクチュエータはコイルと磁石を使うものが多く、デバイスがある程度の大きさになることは避けられない。

図表2 「TECHTILE toolkit」を用いた触覚の取得・記録・伝達・再現



(資料)慶應義塾大学 南澤孝太教授ご提供

そのため、デバイスが人間にとって煩わしく感じ、ユーザー体験の妨げになる点が課題となっている。より良いユーザー体験のためには、メガネやコンタクトレンズと同程度に人間と一体化した、あるいは人間の触覚に錯覚を起こすことで、存在を感じさせないデバイスの開発が望まれる。

その解決策の1つとして、デバイスを衣類に組み込むことも考えられている。産総研と名古屋大学は「着るだけで心電図計測ができるスマートウェア[15]（図表3）」を発表している。このスマートウェアは電気信号を伝達する導電性糸及びフレキシブル基板（FPC）、心電を計測するセンサ（静電植毛電極[16]）、が内蔵されており、スマートフォンなどを接続することで給電・通信を行うことができる。技術的にはセンサをアクチュエータに変えさえすれば、着用者に触覚を感じさせることも可能である。

また、アクチュエータをゴム、布、フィルムなどのソフトな素材で再現し、皮膚に直接貼り付ける（皮膚と一体化させる）試みもある。例えば、豊田合成株式会社と慶應義塾大学の南澤孝太教授らは共同で「e-Rubber[17]」を開発している。「e-Rubber」はゴムでできたソフトアクチュエータであり、電気信号により伸縮することで触覚を再現できる。

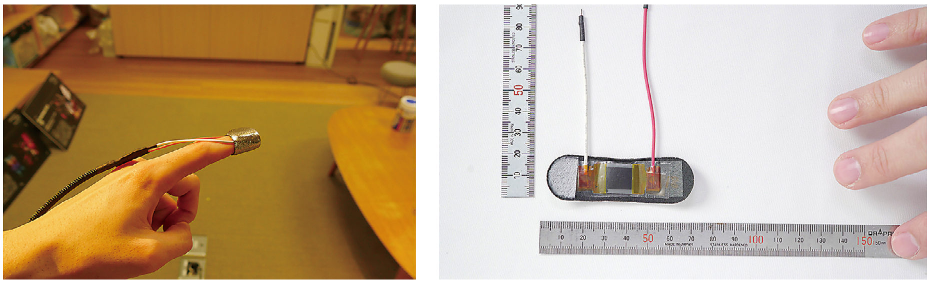
このように、「デバイスとの一体感」を向上できるハプティクスの開発が進むことで、利用者がより使いやすいデバイスが誕生しつつある。将来的には、人間が身に着けても違和感や煩わしさが全く生じない人間拡張デバイスが実現しているかもしれない。

図表3　着るだけで心電図計測ができるスマートウェア

（左）スマートウェア裏面　（中）スマートウェア表面　（右）実際に着用した様子

（資料）産総研　竹下俊弘氏、小林健氏ご提供

図表4　触覚を再現するゴムのアクチュエータ



（左）触覚再現装置

（右）左図の装置の展開図。中心のe-Rubberが伸縮することで触覚を再現する。

（資料）豊田合成株式会社ご提供

4. 人間拡張の活用方法、適用範囲 ～人間拡張がもたらす効果～

本章では、「人間拡張がもたらす効果」を整理・類型化することで、今後の人間拡張の適用範囲や活用方法の可能性を示す。「人間拡張がもたらす効果」は「能力補完」「能力向上」「能力獲得」の3通りに大別できる（図表5参照）。

①　能力補完

能力補完は人間に元々備わっている能力の補完・補助、能力の喪失／低下の防止を目的とした人間拡張である。つまり元々の能力をゼロとしたとき、何らかの理由（老化やけがなど）でゼロからマイナスになった能力をゼロに戻す／近づけること、また能力がマイナスにならないように防ぐことを目的としている。主に義手・義足などの医療機器やヘルスケア現場における介護機器などが該当するほか、パワーアシストスーツによる腰痛防止なども挙げられる。そのほか、人間拡張を活用することで高齢者や傷病者などが快適に生活できる環境を整備することも可能である。例えば、アバターロボットを遠隔操作することで、病院のベッドにいながら別の場所で働くなどが挙げられる（全身の補完と言える）。

②　能力向上

能力向上は人間に元々備わっている能力をさらに向上する、つまり元々の能力をゼロとしたとき、能力をプラスにすることを目的とした人間拡張である。例えば、遠隔手術ロボットはロボットアームの活用で本来の人間の手より可動域を拡大できるほか、手の震えが防止されるなど高精度な執刀が可能である（手術能力の向上と言える）。

③　能力獲得

能力獲得は人間に本来備わっていない新しい能力を獲得することである。もたらす効果は獲得した能力によるため一言で表すことは出来ないが、例えば、ロボットアームを人間に装着し、第3の腕を新たな能力として獲得する取組みがある[18]。また、AR／MRグラスはカメラ映像を用いて振向かずに後方を確認する能力を獲得できるほか、天気予報や時間などを表示することで、情報を視覚で認識する能力を獲得可能である。アバターロボットは遠隔地に自身を存在させる能力を獲得できるほか、複数アバターの同時操作により複数の身体を獲得可能である。

最後に、人間拡張の代表的なアプリケーション例を図表6に示す。ここに記載した例は活用

図表5　人間拡張がもたらす3つの効果

人間拡張がもたらす効果	概要	適用範囲	アプリケーション例
能力補完	人間に元々備わっている能力の補完・補助、能力の喪失／低下の防止	・医療・ヘルスケア ・けが・故障の防止 ・労働環境の整備	・医療機器 ・パワーアシストスーツ （筋力低下の補完、腰痛防止など）
能力向上	人間に元々備わっている能力のさらなる向上	・生産性向上 ・品質向上	・遠隔手術ロボット ・パワーアシストスーツ （運搬能力向上）
能力獲得	人間に本来備わっていない新しい能力の獲得	・様々 （能力によって異なる）	・第3の腕 ・スマートグラス

（資料）みずほ情報総研作成

図表6　代表的な人間拡張のアプリケーションの整理

大分類	小分類	アプリケーション例	拡張領域	概要	アプリケーションの効果			
					補完	向上	獲得	補完／向上／獲得の例
身体の拡張（人間の能力の拡張）	運動器	パワーアシストスーツ	・運搬能力	電動アクチュエータや人工筋肉などの動力により身体の動きをサポートする装着型の機器	○	○		・筋力低下の補完 ・腰痛の防止 ・運搬能力向上による作業時間の短縮
		義手／義足	・四肢 ・触覚	喪失した四肢を代替する人工の四肢	○	○		・喪失した四肢の補完 ・操作能力の向上（より高精度な操作）
		第3の腕	・四肢 ・触覚	自身の3本目の腕として操作できるロボットアーム			○	・3本以上の腕の獲得
	感覚器	メガネ／コンタクトレンズ	・視覚	視力を補完、調節する器具	○			・視力の補完
		人工眼球／網膜	・視覚	電気刺激により視覚情報を脳に伝達する人工感覚器	○			・喪失した視力の代替
		スマートグラス	・視覚 ・情報認知	現実と重ねてデジタル情報を表示するメガネ型の機器。周辺環境を認識するセンサを持たない			○	・デジタル情報を視界で確認する能力の獲得
		AR/MR グラス	・視覚 ・情報認知	現実と重ねてデジタル情報を表示するメガネ型の機器。周辺環境を認識するセンサを持つ		○	○	・視力の向上 ・デジタル情報を視界で確認する能力の獲得 ・後方確認能力の獲得
		補聴器	・聴覚	音声を増幅し、聞き取りを補助する器具	○			・聴力の補完
		人工内耳	・聴覚	音声を電気信号に変換し、聴神経を刺激して脳に伝達する装置	○			・聴力の補完
	脳	脳情報モニタリング学習／訓練	・学習能力	脳情報の計測により人間の集中や記憶の状態を把握し、効率を高める学習／訓練手法		○	○	・学習能力の向上 ・集中状態、記憶状態を把握する能力の獲得
		脳情報機器操作	・命令伝達	脳情報の計測により機器を制御する命令を抽出・伝達し、機器を遠隔制御する技術			○	・機器を遠隔制御する能力の獲得
		記憶チップ	・記憶力	デバイスに人間の記憶情報を記録し、脳の記憶容量を拡大する技術。デバイスを介して他人の記憶情報の閲覧もできる	○	○	○	・記憶障害の補完 ・記憶力の向上 ・他人へ記憶を伝達する能力の獲得
	その他	超音波無発声音声装置	・発声能力	発声せずに話した際の口腔内の動きを計測し、発声内容を復元するシステム	○		○	・声帯の補完 ・発声せずに意思疎通できる能力の獲得
存在の拡張（物理的な身体からの解放）	現実の身体	遠隔手術ロボット	・四肢 ・視覚	術者が患部の立体映像を見ながら遠隔操作でロボットアームを動かす手術器具		○		・手術能力の向上（手の可動域の拡大、手の震えの防止による高精度な執刀）
		アバターロボット	・四肢 ・運搬能力 ・耐久力 ・五感 ・コミュニケーション能力	分身体のロボット（アバターロボット）との感覚共有・遠隔操作により、人を遠隔地に存在させる技術	○	○	○	・全身の補完 ・過酷環境に対する抵抗力の向上 ・遠隔地に自身を存在させる能力の獲得 ・複数の身体の獲得 ・人型でない身体の獲得
	仮想の身体	デジタルアバター	・五感 ・コミュニケーション能力	デジタル空間における仮想の分身体（デジタルアバター）との感覚共有・操作により、仮想空間で活動できる身体を獲得する技術			○	・デジタル空間を体感する能力の獲得 ・遠隔で五感を活用してコミュニケーションする能力の獲得
	他人の身体	体験共有	・四肢 ・五感 ・学習能力	他人の身体感覚や五感などを体感を自分の感覚として体感できる技術。		○	○	・学習能力の向上 ・他人の身体感覚を体感する能力の獲得

（資料）みずほ情報総研作成

方法がある程度明確になっているほんの一例に過ぎないが、今後の研究開発の進展や技術革新、新しい発想・技術の組み合わせなどにより、新たな価値を創出するアプリケーションが次々と生まれてくるのではないだろうか。

5. 人間拡張への期待

本稿では、人間拡張を定義・分類した上で、「デバイスとの一体感」を実現する技術の現状、「人間拡張がもたらす効果」や人間拡張の活用方法および適用範囲について紹介した。

「デバイスとの一体感」の観点では、ハプティクスなどの技術の適用によりデバイスの着用に伴う煩わしさの解消が可能となり、人間拡張の普及が促進される可能性について述べた。また、「人間拡張がもたらす効果」の観点では、効果を3つに分類(①能力補完、②能力向上、③能力獲得)した上で、人間拡張の適用範囲や活用方法について整理し、新たな価値を創出するアプリケーションへの期待を述べた。

我が国においては、産総研が人間拡張研究センターを設立したほか、内閣府がムーンショット型研究開発制度において「2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」を目標として掲げる(19)など、政府主導の研究開発も始まっている。これらの研究開発は、少子高齢化に伴う労働力不足や医療・介護費の高騰など、社会課題の解決に向けた人間拡張の社会実装を目指しており、人間拡張の発展とそれに伴う社会変化は今後加速していくものと期待される。

ここまで述べた通り人間拡張は多様な適用範囲や活用方法が想定され、社会実装は段階的に進むと考えられる。まずは、危険作業や医療・介護などの人間拡張の恩恵が大きく他手法による代替が困難な場面で活用が進み、「デバイスとの一体感」の向上に伴い製造業、サービス業、娯楽、生活などと拡大していくだろう。将来的に人間拡張を日常で利用可能とするためには、我々自身が人間拡張を環境・状況に合わせて効果的に利用するスキルや、人間拡張による社会変化に柔軟に適応するスキルを身に付けていくことも必要である。人間拡張を実現するデバイスの研究開発の進展と、人間拡張の利活用への適応の双方が組み合わさることで、様々な社会課題を克服した未来が訪れるのではないだろうか。

注

(1) ロボットスーツ、パワードスーツとも呼ばれる。
(2) Artificial Intelligence、人工知能
(3) Virtual Reality、仮想現実
(4) Augmented Reality、拡張現実
(5) Mixed Reality 複合現実
(6) Haptics、触覚
(7) 暦本純一 監修「オーグメンテッド・ヒューマン AIと人体科学の融合による人機一体、究極の IF が創る未来」株式会社エヌ・ティー・エス、(2018年)
(8) センター長挨拶(国立研究開発法人産業技術総合研究所 人間拡張研究センター)
https://unit.aist.go.jp/harc/index.html
(9) Effective Learner(株式会社ニューロスカイ)
https://www.neurosky.jp/effective-learner/
(10) GLOWMASTER(Playto Holdings Inc.)
https://playto.org/how-it-works/glowmaster-game/
(11) SottoVoce: An Ultrasound Imaging-Based Silent Speech Interaction Using Deep Neural Networks(東京大学 暦本研究室)
https://lab.rekimoto.org/projects/sottovoce/
(12) 超音波を発生し、はね返ってきた超音波を探知する装置
(13) JackIn Head(ソニーコンピュータサイエンス研究所)
https://www.sonycsl.co.jp/project/2373/
(14) TOOL KIT(TECHTILE)
http://www.techtile.org/techtiletoolkit/
(15) 着るだけで心電図計測ができるスマートウエア(産業技術総合研究所)
https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2019/nr20190610/nr20190610.html
(16) 銀メッキを施した短繊維(導電性繊維)を、表面が柔らかくなるように植毛した電極
(17) e-Rubber(豊田合成株式会社)
https://www.toyoda-gosei.co.jp/e-rubber/
(18) 直感的な随意操作が可能な【第三の腕】の開発(早稲田大学 岩田研究室)

http://jubi-party.jp/research/thirdhand

(19) ムーンショット目標1　2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現（内閣府）
https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub1.html

参考文献

1. 【特集】さよなら重労働、パワーアシストスーツ“普及元年”で変わるもの〈株探トップ特集〉（株探、株式会社ミンカブ・ジ・インフォノイド）
https://kabutan.jp/news/marketnews/?b=n201911280754
2. 力触覚を伝え、記録、編集するリアルハプティクス技術（Medtec Japan、インフォーマ マーケッツ ジャパン株式会社） http://www.medtecjapan.com/ja/news/2016/10/24/1701
3. 自分で触っているような、リアルな感覚を伝えるロボットアーム（PUBLIC RELATIONS OFFICE）
https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/201811/201811_10_jp.html
4. 3Dプリンターで作る筋電義手、臨床応用を目指す（電気通信大学 横井研究室）
https://www.uec.ac.jp/research/information/opal-ring/0005620.html
5. 混同されやすいスマートグラスとARグラス その違いを解説（Mogura VR News、株式会社Mogura）
https://www.moguravr.com/smartglasses-ar-glasses/
6. 似ているようで違う？「AR/MRグラス」と「スマートグラス」（株式会社RAKUDO）
http://www.rakudo.io/blog/index.php/2019/12/24/glasses/
7. 脳波のモニタリングと機械学習で、人間の学習効率が2倍に⁉バイオフィードバック装置による実験が進行中（livedoor NEWS、LINE株式会社）
https://news.livedoor.com/article/detail/16462587/
8. テレイグジスタンスとは（東京大学 舘研究室）
https://tachilab.org/jp/about/telexistence.html#point01
9. 物理的距離と身体的限界をゼロにするavatarin（ANAホールディングス株式会社）
https://avatarin.com/concept/
10. 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター「コロナ渦後の社会変化と期待されるイノベーション像」（2020年）
https://www.nedo.go.jp/content/100919493.pdf
11. 物の形や硬さ、動きを表現するハプティクス技術（日本放送協会 放送技術研究所）
https://www.nhk.or.jp/strl/publica/giken_dayori/156/5.html
12. 触覚を、伝える。（慶應義塾大学 ハプティクス研究センター）
http://haptics-c.keio.ac.jp/
13. 細やかな触感を伝えるテレイグジスタンス遠隔操作ロボットを開発（国立研究開発法人 科学技術振興機構、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科）
https://www.jst.go.jp/pr/announce/20120711/index.html
14. 慶應・野崎研、リアルハプティクスで力触覚を伝える双腕ロボットアームを開発（Impress Watch、株式会社インプレス）
https://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/1083450.html
15. 次世代ゴムはロボットの皮膚や筋肉になる　感じて動くゴム「e-Rubber」豊田合成・慶應大が共同開発、ロボデックスで展示へ（ロボスタ、ロボットスタート株式会社）
https://robotstart.info/2019/01/15/e-rubber-keio-demo.html
16. 雑賀隆史「ロボット手術の現況と展望」岡山医学会雑誌、第123巻、pp.63-64
https://www.jstage.jst.go.jp/article/joma/123/1/123_1_63/_pdf/-char/ja

社会動向レポート

我が国における自動車の外部性を考慮した走行距離課税の検討

—中長期的な自動車関係諸税の見直しに向けて—

環境エネルギー第1部
チーフコンサルタント 川村 淳貴

本稿では、我が国が抱える現行の自動車関係諸税の課題を整理した上で、中長期を見据えた税制の選択肢の一つとして自動車の外部性を考慮した走行距離課税に着目する。さらに、走行距離課税をめぐる国内外の動向を踏まえ、この度構築した税収試算ツールを用いて国内で走行距離課税を導入した際の試行的な分析を行い、車種や地域性の観点から考察する。

はじめに

消費税率10％への引上げが決定した2018年末の政府・与党による平成31年度税制改正大綱[(1)]では、消費税率引上げに伴う自動車の駆け込み需要とその後の反動減への対策として、自動車税種別割の恒久的な税率引下げや、購入時に課される自動車取得税の廃止と1年間の時限的な減税を加えた自動車税環境性能割及び軽自動車税環境性能割の導入など、自動車関係諸税の一部に改正が加えられた。

同大綱の検討事項では、「自動車関係諸税については、技術革新や保有から利用への変化等の自動車を取り巻く環境変化の動向、環境負荷の低減に対する要請の高まり等を踏まえつつ、国・地方を通じた財源を安定的に確保していくことを前提に、その課税のあり方について、中長期的な視点に立って検討を行う。」という文言が記載され、産業・環境・財政等の様々な観点から自動車関係諸税に係る見直しの検討が進められる見通しである。

上記の税制改正における議論の過程では、複数の報道機関において走行距離に応じた課税（以下、走行距離課税という。）に関する報道がなされた[(2)(3)]。確かに、カーシェアや電気自動車など新たな技術・サービスに依らず、あらゆる自動車に共通する走行距離に課税する案は、安定的な財源の確保を実現する有力な選択肢の一つである。しかしながら、走行距離課税の有用性はこれだけではない。走行時の場所や時間帯、道路の種類等に応じた税率の設定により、騒音や大気汚染、道路損傷などの自動車利用による様々な負の外部性（ある経済主体の行動が他の経済主体に損害を与え、影響を及ぼす主体がその対価を払わないでいること）に精緻に対処できるという利点を持つ。他方で、税制の見直しにおいては、税負担者の負担感や公平感といった社会的受容性の観点から、税制の見直しが既存税制の税収総額に影響を与えないことを指す税収中立性を確保することが望ましく、どのような税体系であればどの程度の税収が見込めるかという点を明らかにすることも重要である。以上を踏まえて、本稿では次の構成で議論を進めていく。1章では、自動車関係諸税の見直しの方

向性として、現行の自動車関係諸税の課題や課税根拠の観点から外部性に着目すべき根拠を整理する。2章では、外部性に関する国内外の研究事例を整理しつつ、走行距離課税の優位性を明らかにする。3章では、自動車の外部性を考慮した走行距離課税の事例として、関連する欧州指令の動向や導入国における制度設計、欧州委員会が実施する外部費用に関する評価を取り上げる。4章では、日本で外部性を考慮した走行距離課税を導入することを念頭に置き、税収中立性を定量的に評価するための分析ツールを構築し、試行的な分析を行った上で、車種（乗用車・バス・貨物車等）や地域性による税負担額の観点から考察する。

1. 現行税制が抱える課題と税制の見直しの方向性

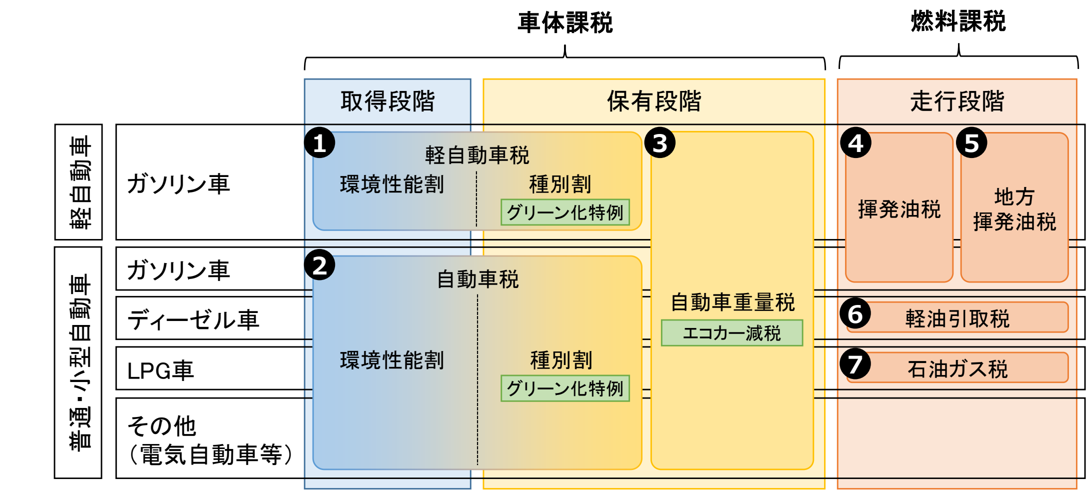
はじめに、現在、7つの税目で構成される自動車関係諸税に対し、自動車業界から税制の簡素化が求められていることや、一部の税目で電気自動車やシェアリングサービスへの対応に支障が生じていることから、取得段階と保有段階の税の役割が弱まりつつあることを示す。その上で、課税根拠の観点から「自動車の外部性を考慮した走行段階の課税への移行」という見直しの方向性を導く。

(1)自動車関係諸税の複雑さ

最初に、現行の自動車関係諸税について整理しておきたい。自動車関係諸税は「取得」「保有」「走行」の3つの段階において7つの税目で構成されている（図表1）。

取得段階では、自動車税環境性能割又は軽自動車税環境性能割（旧自動車取得税）がその車の取得価額（車両購入価格等）に応じて課される。保有段階では、毎年4月1日時点での自動車の所有者に対して、自動車税種別割又は軽自動車税種別割が車両の種別や総排気量等に応じて毎年課され、車検時には自動車重量税が車両の重量に応じて課される。なお、保有段階の税目には、エコカー減税やグリーン化特例と呼ばれる車両の環境性能に応じて税負担を軽減する時限的措置も併せて講じられる。走行段階では、ガソリンに対する揮発油税及び地方揮発油税、軽油に

図表1　日本の自動車関係諸税の全体像



（注）これらに加えて車両や燃料の購入時には消費税も課されるが、本稿では扱わないこととする。
（資料）みずほ情報総研作成

対する軽油引取税、LPGに対する石油ガス税がそれぞれ課されており、走行時の燃料消費量に応じて税を負担している。

このように、自動車関係諸税には数多くの税目が異なる段階で課されることから、特に自動車業界から「取得時には、自動車税の環境性能割・消費税・自動車税の初年度月割課税の3つが課せられ、複雑な体系となっており、簡素化の観点から自動車税の初年度割課税は廃止すべき」との要望や「自動車重量税は、創設の経緯等からすると本来であれば直ちに廃止すべきだが、保有時の税負担軽減・税制の簡素化の観点から、先ずは本則税率に上乗せされている“当分の間税率”を廃止すべき」との要望など、取得段階や保有段階の一部の税目の廃止による簡素化の要望が根強く残っている(4)(5)。

また、取得段階の環境性能割や保有段階のエコカー減税・グリーン化特例と呼ばれる、省エネ法で定める2020年度の燃費基準値の達成率に応じて減税措置が講じられているが、図表2に示すように各税目で減税率がそれぞれ異なっている状況も確認できる。こうした環境インセンティブの不均一性は、税制の簡素化が進むことで是正される可能性がある。

(2)電気自動車における課税標準の喪失やシェアカー利用時の税負担構造の違い

CASE（Connected（コネクテッド）、Autonomous（自動運転）、Shared & Services（シェアリング／サービス）、Electric（電気自動車）の頭文字を取った造語）が象徴するように、ここ数年で自動車にまつわる新しい技術やサービスが急速に広まりつつある。このような時代の潮流は、我が国の自動車関係諸税にも影響を及ぼしている。

例えば、内燃機関を持たない電気自動車や燃

図表2　乗用車に対する環境性能に応じた減税率

対象車両	取得段階		保有段階			
	環境性能割の減税率(注2)		エコカー減税		グリーン化特例	
	自動車税環境性能割	軽自動車税環境性能割	自動車重量税 初回	自動車重量税 2回目	自動車税種別割	軽自動車税種別割
電気自動車等(注1)	非課税	非課税	免税	免税	▲75%	▲75%
2020年度燃費基準+90%						▲50%
2020年度燃費基準+50%				軽減なし		
2020年度燃費基準+40%						
2020年度燃費基準+30%			▲50%			
2020年度燃費基準+20%					▲50%	▲25%
2020年度燃費基準+10%	▲67%		▲25%			
2020年度燃費基準達成	▲33%	▲50%			軽減なし	軽減なし
2020年度燃費基準未達成	軽減なし	軽減なし	軽減なし			

（注1）電気自動車、燃料電池自動車、天然ガス自動車、プラグインハイブリッド車、クリーンディーゼル車を指す。
（注2）実際の環境性能割は、環境性能に応じて取得価額に対する税率が設定される（自家用乗用車は0・1・2・3%の4段階、軽乗用車及び営業用乗用車は0・1・2%の3段階）。ここでは、エコカー減税やグリーン化特例と比較可能とするため、最高税率からの実質的な減税率として記載している。
（注3）ここでは、消費税率引上げ及び新型コロナウイルス拡大に伴う環境性能割に対する2021年3月末までの例外的な減税措置を外した減税率を示している。
（資料）みずほ情報総研作成

料電池自動車では、総排気量がゼロになるため、総排気量に応じて税率が定められる自動車税種別割では、常に最低税率が適用される。また、図表1に示すように、自動車用途の電力等に課される走行段階の税目は現時点で創設されておらず、車両の燃料種によっては税負担の公平性が担保されない。特に電力においては、ガソリンスタンドのような燃料の供給設備が、公的な充電ステーションだけでなく自宅や職場等にもある。後者は自動車用途とそれ以外の用途が区別できない限り税を課すことが困難であり、このことが電気自動車に対する燃料課税の導入を難しくしている。

また、シェアリングサービスの普及は、自動車を保有せずに利用するユーザーを増加させる。従来、取得段階及び保有段階の税金（以下、車体課税という。）の負担者は、所有者でもあり利用者でもあるユーザーであったが、シェアカーを利用する場合、車体課税が保険料や車両メンテナンス費等と一体化されてシェアカーの利用料金に内包される。これは、個々の税目に対する負担感や認知度合いが自家用車ユーザーに比べて相対的に薄まる可能性や、シェアカー事業者が利用料金に車体課税を適切に転嫁せず、自家用車とシェアカーでユーザーの税負担に格差を生じさせる可能性がある。そしてこれらは、次項で整理する各車体課税が本来備える性格を曖昧にすることにもつながる。

(3)課税根拠からみる外部性を考慮することの重要性

前項で整理したように、現行の車体課税は、電気自動車やシェアリングサービスの普及に対応しきれない可能性が高く、また根強い自動車業界からの税制の簡素化の要望も踏まえると、車体課税の役割は徐々に弱まっていくと予想される。

今後中長期的な検討を行う際は、車体課税が本来持つ役割を活かした形で自動車関係諸税の見直しを行うことが望ましい。そこでまず、各税目の課税根拠から車体課税の役割を把握する（図表3）。

このうち、総排気量に紐づく「財産税的性格」

図表3　車体課税の課税根拠

段階	税目	課税根拠
取得	自動車税 環境性能割 軽自動車税 環境性能割	・権利の取得・移転に担税力を認めて課される流通税であるとともに、自動車の取得が一種の資産形成としての性格を有する。 ・自動車がもたらす交通事故、CO_2排出、公害、騒音等の「**社会的費用**」に対応して地方自治体が提供する行政サービスから便益を受けることに着目して課される。
保有	自動車税 種別割	・「**財産税的性格**」と「**道路損傷負担金的性格**」を併せ持つ税であるとされている。税率区分として、総排気量（乗用車）や最大積載量（トラック）等が採用されており、前者が主に「**財産的価値**」を、後者が主に「**道路損傷負担**」の程度を測る。 ・環境性能に応じた初年度軽課、後年度重課が特例措置として講じられるなど、「環境損傷負担金的性格」も併せ持つ。
	軽自動車税 種別割	・自動車税と同様、「**財産税的性格**」と「**道路損傷負担金的性格**」を有する。 ・環境に対して一定の負荷を与えていることから、「**環境損傷負担金的性格**」も併せ持つ。
	自動車 重量税	・自動車の走行が、道路混雑、交通安全、道路事故等に関連して多くの「**社会的費用**」をもたらしていることや、社会資本の充実の要請が強いことを考慮して、広く自動車の使用者に負担を求める。 ・重量に応じて段階的に税率を設定している点で、「**道路損傷負担金的性格**」が強い。

（資料）総務省「自動車関係税制のあり方に関する検討会報告書」(6)、東京都税制調査会「平成30年度東京都税制調査会答申」(7)等に基づきみずほ情報総研作成

は、文字通り乗用車を財産とみなし、所有に対して税を負担する能力を見出すものであり、総排気量が大きいほど税負担は大きくなる。だが、先述のように電気自動車や燃料電池自動車は排気量という概念自体がないため、総排気量の大きさを財産税の指標とすることは今後難しくなるだろう。

一方で、環境性能割や自動車重量税の課税根拠とされる「社会的費用」とは、自動車がもたらす大気汚染や渋滞、交通事故等に伴い社会全体が被る損失を指す。具体的には道路建設費用や交通事故による医療費用、公害対策費用等が挙げられ、図表3にある「道路損傷負担金」や「環境損傷負担金」も内包している。このうち、社会的費用を発生させる主体が直接負担していない損失に伴う費用を外部費用と呼び、そのような外部費用を構成する要素を外部性と呼ぶが、先述した自動車に関連する交通事故や道路建設、大気汚染等による外部性は今後も対策が必要な事項であり、自動車の外部性に対応するという車体課税の役割を維持していく必要がある。

以上を踏まえると、中長期的な自動車関係諸税の見直しの方向性として、“車体課税を縮小させつつ自動車の外部性を考慮した走行段階の課税に移行する”という選択肢が浮かび上がってくる。次章では、外部性と走行段階の課税に焦点を当てて、我が国に望ましい課税方式の検討を進めていく。

2. 自動車の外部性と課税方式に関する国内外の学術的知見

まずは、自動車の外部性に関する国内の文献から、自動車の主な外部性を洗い出す。次に、国際機関による最新の報告書から、幅広い外部性を考慮できる課税方式として、走行距離課税が効果的であることを示す。

(1)国内における自動車の外部性に係る検討

国内における自動車の外部性については、古くは1974年に出版された宇沢弘文氏の著書『自動車の社会的費用』で先駆的に取り上げられている。詳しい内容は割愛するが、自動車の利用者が負担すべき一台当たり社会的費用は約1,200万円にのぼると試算し(8)、当時多くの議論を呼んだ。その後も、自動車利用に対する最適な費用負担の水準を外部性の観点から分析した研究が行われている。

2000年以降では、兒山・岸本(2001)(9)や金本(2007)(10)を中心に、日本全国の乗用車、バス、貨物車等の車種毎の外部費用を推定し、それらを内部化するための走行距離当たり費用を試算している。主な外部性としては、兒山・岸本(2001)では、道路損傷、大気汚染、騒音、事故、混雑、気候変動を、金本(2007)では、道路損傷、大気汚染、原油依存、事故、混雑、気候変動をそれぞれ取り上げている。さらに、金本(2007)では、自動車の外部性に係る理想的な課税方式として、燃料税や走行距離課税を触れつつ、次のように言及している。

① 地球温暖化及び原油依存に関する費用について、燃料税を課税する。(中略)これから地球温暖化問題がより深刻になっていくと、さらに上昇していく。他方、温室効果ガスの排出が少ない燃料タイプについては、燃料税を軽課する必要がある。

② 混雑、事故等の費用に対しては、走行距離課税が望ましい。(中略)混雑費用は混雑の程度によって大きく変動するので、混雑度に応じた混雑料金を導入することが望ましい。

③ 保有によって発生する外部費用はほとんどないので、保有税と取得税を廃止し、走行料金に移行することが望ましい。

④　道路損傷費用は車軸重量の大きい大型車以外については無視できるので、現行の自動車重量税を廃止して、大型車に対する走行距離課税に移行することが望ましい。

(2)国際機関の整理からみる走行距離課税の優位性

海外に目を向けると、国際エネルギー機関(IEA)や経済協力開発機構(OECD)が、2019年に外部性の観点で車体課税、燃料課税、走行距離課税の課税方式について比較検討を行った報告書をそれぞれ公表している。

IEA（2019）(11)では、車体課税、燃料課税、走行距離課税の効果について、税収安定性、気候変動や大気汚染、道路損傷によるコストの内部化、導入容易性の観点で整理している(図表4)。走行距離課税は場所に応じて税率を変えることができるため、大気汚染や道路損傷、渋滞による外部性に対し、より効果的であるとしている。

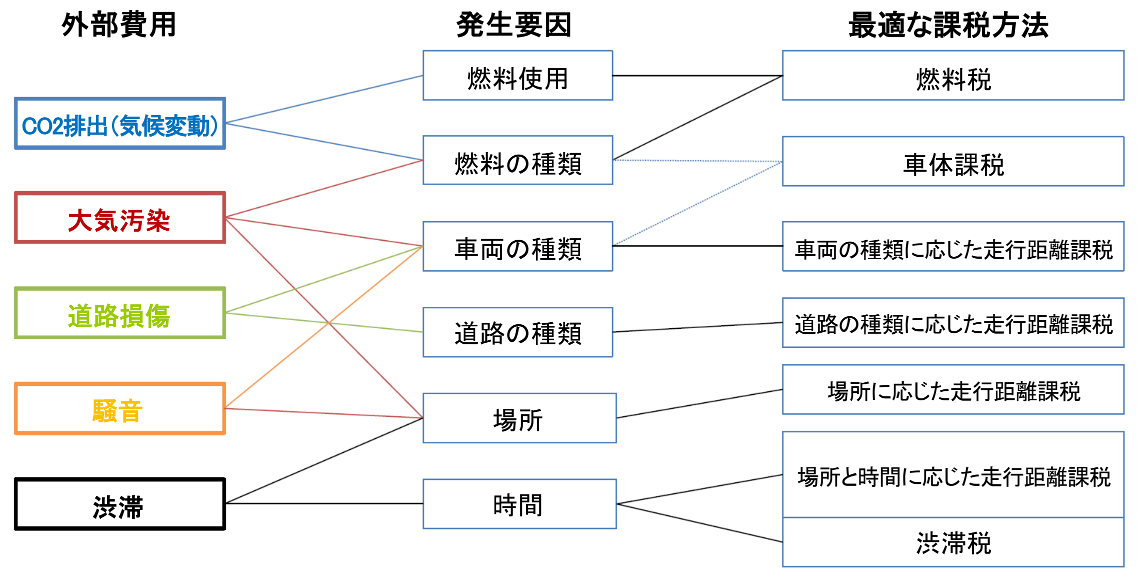
同じく2019年にOECDの税制・環境ユニット長であるKurt Van Dender博士が執筆したワーキングペーパー(12)では、自動車による各外部性に対応する発生要因と最適な課税方法を整理している(図表5)。例えば、CO_2排出による外部性に対しては、CO_2排出の発生要因となる「燃料の使用」や「燃料の種類」に応じて課税することが有効であり、燃料課税やCO_2排出量に応じた車体課税が適切であるとしている。また、

図表4　自動車関係諸税の効果の整理(IEA, 2019)

項目	車体課税	燃料課税(炭素税)	走行距離課税
長期的な税収安定性	【効果的】税収安定性を確保するため、代替燃料車両についても、徐々にフィーベート(注1)あるいは差別化された車体課税の対象とする必要がある。	【限定的】ゼロエミッション車やゼロエミッション燃料／電気への移行により、燃料税による税収は減少する。	【効果的】輸送用燃料や車両でなく、旅客需要に関連するため、輸送が脱炭素化しても安定した税収を確保する。
GHG排出コストの内部化	【限定的】特定の燃費に応じて設定できるが、燃料の炭素強度の違いや車両の走行距離を反映することはできない。	【効果的】CO_2排出量は燃料の使用量に比例するため、燃料税によりCO_2排出量の外部費用を計上できる。	【限定的】1km当たりのエネルギー消費量を反映した設計が可能だが、エネルギー源の炭素集約度の違いを反映できない課題に直面する。
大気汚染コストの内部化	【限定的】車両の汚染物質の排出性能を考慮できるが、地理的範囲が限られた汚染や影響を反映できない。	【限定的】燃料の品質に応じて設定できるが、地理的範囲が限られた汚染や影響を反映できない。	【効果的】車両の汚染物質排出性能を反映した設計が可能であり、また、地理的範囲が限られた外部費用を反映することができる。(大気汚染物質の曝露は場所により異なる。)
インフラコストの補填	【限定的】車両の走行距離の違いや、利用する交通インフラの場所や類型(注2)を反映できない。	【限定的】1km当たりエネルギー消費量を考慮した設計が可能であるが交通インフラの場所や類型(注2)を反映できない。	【効果的】地理的範囲を特定できる特性があることから、インフラコストの補填に最も適する。また、交通インフラの使用頻度(渋滞)への対処にも最適である。
導入容易性	【効果的】行政コストが低く、容易に徴収できる。	【効果的】行政コストの負担が少なく、容易に徴収できる。	【限定的】高い行政コストの壁に直面するが、技術進歩によりコスト削減の余地があり、実証された技術はプライバシー問題にも対処できる。

（注1）自動車の燃料消費量と排出ガスを削減するための政策で、燃費の悪い車には課徴金を課し、燃費の良い車には税額を減免するスキームを指す。
（注2）高速自動車国道や一般国道、私道など道路の種類による類型を指す。
（資料）IEA（2019）「Global EV Outlook 2019」Table5.5. に基づきみずほ情報総研作成

図表5 各外部性に対応する課税標準と最適な税制の関係



（資料）Van Dender, K.（2019）「Taxing vehicles, fuels, and road use Opportunities for improving transport tax practice」Figure 2. に基づきみずほ情報総研作成

大気汚染による外部性に対しては「燃料の種類」「車種の種類」「場所」が、騒音による外部性に対しては「車両の種類」「場所」が、渋滞による外部性に対しては「場所」「時間」が、道路損傷に対しては「車種」「道路の種類」に応じた課税がそれぞれ効果的であり、それらの発生要因を適切に捕捉する課税方式の多くは走行距離課税であることが示されている。

3. 欧州における外部性を考慮した走行距離課税の動向

これまでの議論から、幅広い外部性に対処できる課税方式として走行距離課税が適切であることが確認できる。既に欧州諸国の一部、米国の一部の州、ニュージーランドを中心に、走行距離課税の導入又は実証実験が進められているが、自動車の外部性を考慮した走行距離課税の検討は特に欧州で先行している。そこで、欧州におけるユーロビニエット指令と欧州各国の導入状況、外部機関によるユーロビニエット指令の評価について整理する。

（1）ユーロビニエット指令と欧州各国の導入状況

欧州で外部費用を考慮した走行距離課税が推進される背景の一つに「ユーロビニエット指令」がある。ユーロビニエット指令は、欧州各国での自動車関係諸税の違いが、国間を移動する輸送事業者の競争性を阻害しているとして、これらを是正することを目的に、自動車関係諸税の枠組みの設定し、高速道路を利用する大型貨物車に利用時間に応じた課金又は走行距離に応じた課金を認める指令として1993年に制定された[(13)]。

その後、1999年には「利用者負担原則」と「汚染者負担原則」を明確化し、道路損傷に対する課金の考え方を規定する指令（Directive 1999/62/EC）が制定され、2006年には対象車両を車両総重量12トン以上から3.5トン以上に拡大する改正指令（Directive 2006/38/EC）が制定された。2011年には、「汚染者負担原則」の強化として

税率の算定根拠に大気汚染と騒音に係る外部費用の上乗せを可能とする改正指令（Directive 2011/76/EU）が制定され、現行の指令となっている。

直近では、Directive 2011/76/EU の改正案（COM/2017/275）が2017年5月に提出され、議論が続けられている（2020年4月末時点）。本改正案では、定期的に渋滞が発生する区間や時間帯、曜日、季節に応じた混雑課金に加え、小型車（乗用車、バン、ミニバス）にCO_2排出量や大気汚染物質の排出量に応じた課金が推奨されており、対象車種の拡大や考慮する外部性の拡大が見込まれている。

実際に、欧州各国ではユーロビニエット指令に基づき、貨物車やバスに対する走行距離課税の導入を進めている。図表6に、2020年1月時点に走行距離課税を導入している国々の制度概要を整理した。いずれの国でも車両の重量や積載量

図表6　欧州における走行距離課金の導入状況（2020年1月時点）

国	導入年	対象道路	対象車両	税率区分
スイス	2001	あらゆる公道	貨物車（車両総重量3.5トン以上）	・欧州排ガス規制 ・総積載重量
オーストリア	2004	高速道路	貨物車・バス（車両総重量3.5トン以上）	・欧州排ガス規制 ・最大積載量・車軸数 ・時間帯
ドイツ	2005	高速道路及び一部の連邦道路	貨物車（車両総重量7.5トン以上）	・欧州排ガス規制 ・車両総重量・車軸数 ・騒音
チェコ	2007	高速道路及び一部の公道	貨物車・バス（車両総重量3.5トン以上）	・欧州排ガス規制 ・最大積載量・車軸数 ・時間帯 ・対象道路
スロバキア	2010	高速道路及び一部の公道	貨物車・バス（車両総重量3.5トン以上）	・欧州排ガス規制 ・最大積載量・車軸数 ・対象道路
ポーランド	2011	高速道路及び一部の公道	貨物車・バス（車両総重量3.5トン以上）	・欧州排ガス規制 ・最大積載量 ・対象道路
ハンガリー	2013	高速道路及び一部の公道	貨物車（車両総重量3.5トン以上）	・欧州排ガス規制 ・最大積載量・車軸数 ・対象道路
ベルギー	2016	高速道路及び一部の公道	貨物車（車両総重量3.5トン以上）	・欧州排ガス規制 ・最大積載量 ・対象道路
スロベニア	2018	高速道路及び一部の公道	貨物車（車両総重量3.5トン以上）	・欧州排ガス規制 ・最大積載量 ・対象道路

（資料）みずほ情報総研作成

に応じた道路損傷の費用負担だけでなく、欧州排ガス規制に応じた大気汚染による外部性の内部化を進めている。また、オーストリア及びチェコでは時間帯に応じた混雑による外部性、ドイツでは騒音による外部性の内部化を進め、多くの国では対象道路に応じて税率を変えることで、道路損傷の費用負担の精緻化を試みている。

他方で、走行距離課税の導入に失敗した国もある。例えばオランダでは、2009年に取得段階の課税と保有段階の課税を撤廃して走行距離課税に一本化する法案が議会に提出され、2012年より乗用車を含めた全車両に段階的に導入する予定であったが、2010年の内閣総辞職・総選挙に伴い法案が事実上凍結され、2011年に法案が撤回されている。これは、一部メディアによって、走行データの取得によるプライバシーの侵害や複雑な仕組みによる税負担の増加を報じられたことが撤回の一つの要因とされている(14)。但し、2019年9月のインフラ・水管理省による公表資料(15)によれば、2023年に車両総重量3.5トン以上の貨物車に走行距離課税を導入することが目指されており、議論は継続している模様である。

このように欧州では加盟国によって導入の進度が異なるものの、着実に走行距離課税の導入が広がっており、対象車種や考慮する外部性の拡張が進められている。

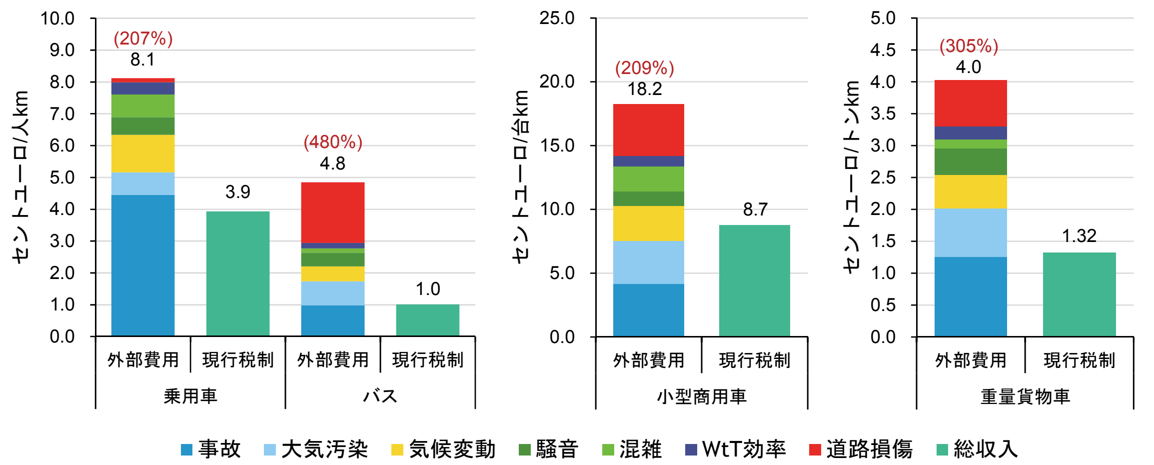
(2)ユーロビニエット指令に対する評価

2006年に改正指令として制定したDirective 2006/38/ECでは、対象車両の拡大に併せて、欧州委員会に対し外部費用を評価するための汎用的かつ適用可能で透明性のある包括的なモデルの提示を求めた。これに従い、2008年に外部費用の算定ハンドブック(Handbook with estimates of external costs in the transport sector)の初版が公表され、2014年には第2版、2019年には欧州委員会からの委託を受けてオランダの調査コンサルティング会社であるCE Delft社が執筆した第3版として、European Commission(2019)(16)が公表されている。

CE Delft社のプロジェクトでは、外部費用の算定手法の見直しだけでなく、自動車・鉄道・船舶・航空を含むあらゆる輸送モードに課される税金及び料金の総収入額を調査しており、算出された外部費用と現行税制の総収入額を比較して、外部費用をどの程度内部化しているかも分析している。また、算定対象とする外部性は、道路損傷、大気汚染、騒音、事故、混雑、気候変動に加え、燃料の精製から車両への燃料の輸送にかけて排出されるCO_2排出量や大気汚染物質等による外部性を指すWtT効率を含めて評価している。

CE Delft社が試算した欧州28カ国全体での車種別(乗用車、バス、小型商用車、重量貨物車)の輸送量当たり外部費用と総収入を図表7に示す。ここでは、乗用車及びバスは人キロ当たり費用、小型商用車は台キロ当たり費用、重量貨物車はトンキロ当たり費用で算出されている。いずれの車種も、総収入は外部費用の総額を下回っており、現行の税制及び料金体系では外部費用を全て内部化するほどの水準に達していないことが示されている。なお、図表中に赤字で括弧書きした数値は、現行税制の総収入額に対する外部費用総額の割合を示し、この値が100％以下であれば、全ての外部費用が内部化されているとみなすことができる。

図表7　輸送量当たり外部費用と総収入の比較（欧州28ヵ国平均）



（注1）赤字で括弧書きした数値は、現行税制の総収入額に対する外部費用総額の割合を示し、この値が100％以下であれば、全ての外部費用が内部化されているとみなすことができる。
（資料）European Commission（2019）「Assessment of the State of play of Internalisation in the European Transport Sector」における公表データ（Annex D Final_total_avg_Cross Modal Comparisons.xlsx）に基づきみずほ情報総研作成

4. 走行距離課税の税収試算ツールの構築と分析

ここからは、我が国における走行距離課税の検討に役立てるため、任意の税率に応じて車種別・都道府県別等に税収額を試算するツールを紹介する。実際の制度設計の議論では、ユーザーや運送業者への税負担や社会受容性の観点から、現行の自動車関係諸税と税収中立的な税率の設定が求められる。ここでは、欧州の税率の設定方法を参考にしながら、①欧州で求められる外部費用を内部化する税率水準、②日本の自動車関係諸税の総税収額と中立する税率水準とする2つの税率シナリオを設定し、試行的な分析結果を提示する。

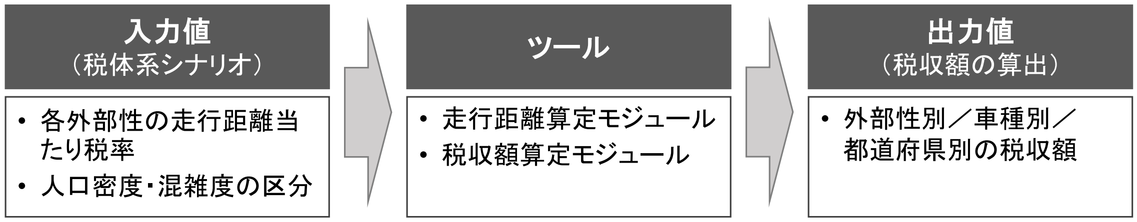
（1）税収試算ツールの構築

図表8に示したように、本ツールでは、各外部性の走行距離当たり税率、大気汚染や騒音の強度に紐づく人口密度の区分、混雑の強度に紐づく混雑度の区分を任意に設定することができる。また、ツール内には、所与として走行距離や人口密度等のデータが格納され、走行距離や税収額を算定するモジュールが組み込まれており、異なる入力値を与えた場合のシナリオ毎に、外部性別・車種別・都道府県別の税収額が出力値として算出される仕組みとなっている。

本ツールで扱う外部性は、図表5で示したVan Dender, K.（2019）で整理されている道路損傷、大気汚染、騒音、混雑、気候変動の5種類とする。また、3章で取り上げたCE Delft社の最新の外部費用算定ハンドブック[17]及び主要な統計データとして用いる国土交通省の平成27年度一般交通量調査のデータ構造を参考に、各外部性の税率に影響を及ぼす10の税率区分を設定した（図表9）。

全ての外部性に共通する「車種」は、軽乗用車、小型乗用車、普通乗用車、バス、軽貨物車、小型貨物車、普通貨物車、特種車の8種類とする。道路損傷では、走行する道路に応じて維持・修繕費等が異なるため、道路種別に税率を設定可能とした。「道路種」は、一般交通量調査の区

図表8　本ツールにおける入力値・出力値



（資料）みずほ情報総研作成

図表9　本ツールにおける各外部性の税率区分

外部性	道路損傷	大気汚染	騒音	混雑	気候変動
税率区分	・車種別 ・道路種別	・車種別 ・人口密度の区分別	・車種別 ・人口密度の区分別 ・時間帯別	・車種別 ・混雑度の区分別	・車種別

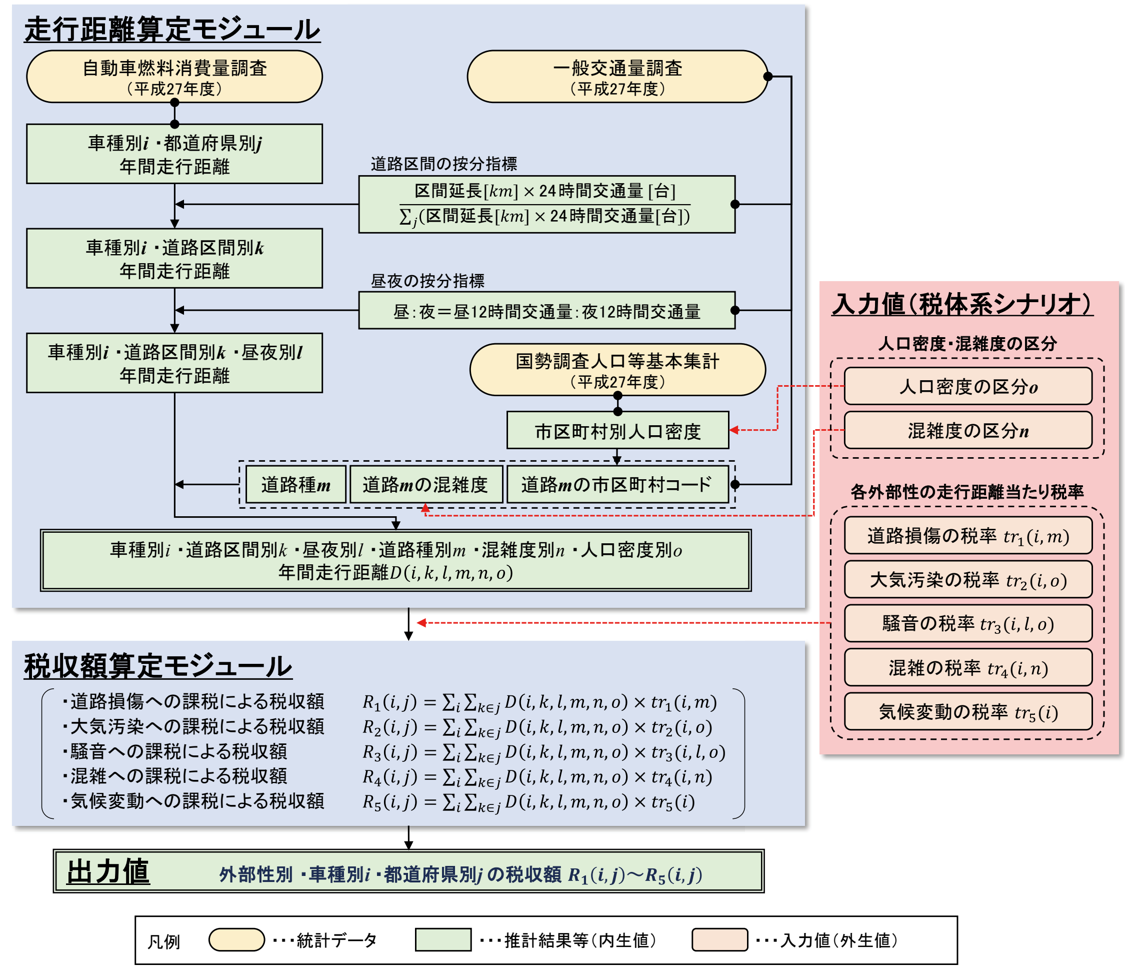
（資料）みずほ情報総研作成

分に基づき、高速自動車国道、都市高速道路、一般国道、主要地方道（都道府県道）、主要地方道（指定市市道）、一般都道府県道、指定市の一般市道の7区分とする。大気汚染では、自動車から排出される大気汚染物質の曝露度合いは、人口密度の高い地域ほど大きいため、各道路が整備される市区町村の「人口密度」を区分として税率を設定する。なお、その区分もツール上で変更可能とした。騒音では、騒音の曝露度合いは人口密度の高い地域ほど影響が大きく、時間帯によっても影響が異なることから、昼・夜の2パターンで税率を設定する。混雑では、各道路区間の「混雑度」を区分として税率を設定する。なお、混雑度は一般交通量調査の値を参照し、その区分もツール上で変更可能とした。気候変動では、簡便な形として車種毎に税率を設定可能とした。

ツールの入力値・モジュール・出力値までのフロー図を図表10に示す。走行距離算定モジュールでは、まずは自動車燃料消費量調査より、年間走行距離の実績値を都道府県別かつ車種別に整備する。次に、全国における約10万の道路区間の交通量や区間延長等を整理する一般交通量調査を用いて、都道府県別から道路区間別の年間走行距離に按分する指標や昼間と夜間の年間走行距離に按分する指標を作成し、車種別・道路区間別・昼夜別の年間走行距離を推計する。そして、一般交通量調査で各道路区間に割り付けられる道路種、市区町村コード、混雑度を紐づけ、市区町村コードと国勢調査の市区町村別人口密度を対応させることで、車種別・道路区間別・昼夜別・道路種別・人口密度別・混雑度別の年間走行距離を推計する。税収額算定モジュールでは、入力値として設定する各外部性の走行距離当たり税率に走行距離算定モジュールで算定した年間走行距離を乗じて、外部性別・車種別・都道府県別の税収額に集約する。

なお、一般交通量調査の結果は5年置きに公表され、直近では平成27年度の調査結果であるため、自動車燃料消費量調査及び国勢調査も平

図表10　ツールにおける入力値・モジュール・出力値までのフロー図



（資料）みずほ情報総研作成

成27年度の結果で統一した。従って、本ツールで得られる分析結果は、平成27年度の道路交通状況に、事後的に走行距離課税を課した場合の推計値であることに留意されたい。また、本ツールに係わるその他の詳細については筆者まで問合せいただきたい。

(2)税率シナリオの設定

本ツールに与えるシナリオとして、ここでは、欧州で求められる外部費用を内部化する税率水準を与えた“欧州シナリオ”と、日本の自動車関係諸税の総税収額と中立する税率水準である“税収中立シナリオ”の2つを設定する。

欧州シナリオでは、図表7で活用したEuropean Commission（2019）における欧州28ヵ国平均の輸送量当たり外部費用を、日本の一台当たり平均輸送人数や一台当たり平均積載量を用いて走行距離当たり外部費用に加工した上で、2015年の為替レートにより日本円に換算したものを税率として設定する。欧州シナリオでは、図表7のような車種別の外部費用を内部化する割合が本ツールでも表現されているかどうかを確認する。

それに対して、税収中立シナリオでは、日本の自動車関係諸税の総税収額と一致させるため

に、欧州シナリオの税率を、欧州シナリオの税収と日本の自動車関係諸税の税収の割合で一律に乗じることで設定する。単純な設定方法ではあるが、欧州の外部費用の考え方に基づきつつ、我が国にとって税収中立的な走行距離課税の構想の一助となる。

なお、図表7の車種とツール上の車種の関係について、乗用車は軽乗用車・小型乗用車・普通乗用車に、軽量商用車は軽貨物車・小型貨物車に、重量貨物車は普通貨物車にそれぞれ対応すると仮定した。特種車は対応する車種が無いため、全て非課税としている。

また、大気汚染及び騒音の人口密度の区分は、200人/km^{2}未満、200～2000人/km^2、2000人/km^{2}超の3区分とし、人口密度が高くなると2倍又は3倍となるように設定した。加えて、騒音による夜間の税率は昼間の税率の2倍となるよう設定した。また、混雑度の区分は0.75未満、0.75～1.0、1.0超の3区分とし、混雑度が高くなると2倍又は3倍となるよう税率を設定した。加えて、高速道路に対する道路損傷の税率は、既に高速道路料金を徴収していることから非課税とした。これらの想定に基づき設定された、欧州シナリオの税率は図表11となる。

図表11　本試算における税率の設定値とツール上の入力イメージ

税率設定シート

1．道路損傷　　（単位：円／km）

道路種＼車種	軽乗用車	小型乗用車	普通乗用車	バス	軽貨物車	小型貨物車	普通貨物車	特種車
高速自動車国道	0	0	0	0	0	0	0	0
都市高速道路	0	0	0	0	0	0	0	0
一般国道	3.9	3.9	3.9	23.8	4.9	4.9	16.9	0
主要地方道（都道府県道）	3.9	3.9	3.9	23.8	4.9	4.9	16.9	0
主要地方道（指定市市道）	3.9	3.9	3.9	23.8	4.9	4.9	16.9	0
一般都道府県道	3.9	3.9	3.9	23.8	4.9	4.9	16.9	0
指定市の一般市道	3.9	3.9	3.9	23.8	4.9	4.9	16.9	0

2．大気汚染

人口密度＼車種	軽乗用車	小型乗用車	普通乗用車	バス	軽貨物車	小型貨物車	普通貨物車	特種車
200人／km² 未満	1.3	1.3	1.3	4.6	4.1	4.1	5.5	0
200～2000人／km²	2.7	2.7	2.7	9.1	8.1	8.1	11.0	0
2000人／km² 超	4.0	4.0	4.0	13.7	12.2	12.2	16.5	0

3．騒音

人口密度＼車種	軽乗用車	小型乗用車	普通乗用車	バス	軽貨物車	小型貨物車	普通貨物車	特種車
昼：200人／km² 未満	1.0	1.0	1.0	2.6	1.4	1.4	3.0	0
昼：200～2000人／km²	2.1	2.1	2.1	5.1	2.7	2.7	6.1	0
昼：2000人／km² 超	3.1	3.1	3.1	7.7	4.1	4.1	9.1	0
夜：200人／km² 未満	2.1	2.1	2.1	5.1	2.7	2.7	6.1	0
夜：200～2000人／km²	4.2	4.2	4.2	10.3	5.5	5.5	12.1	0
夜：2000人／km² 超	6.3	6.3	6.3	15.4	8.2	8.2	18.2	0

4．混雑

混雑度＼車種	軽乗用車	小型乗用車	普通乗用車	バス	軽貨物車	小型貨物車	普通貨物車	特種車
0.75未満	1.3	1.3	1.3	0.8	2.4	2.4	1.0	0
0.75～1.0	2.7	2.7	2.7	1.7	4.7	4.7	1.9	0
1.0超	4.0	4.0	4.0	2.5	7.1	7.1	2.9	0

5．気候変動

車種	軽乗用車	小型乗用車	普通乗用車	バス	軽貨物車	小型貨物車	普通貨物車	特種車
（全走行共通）	2.2	2.2	2.2	2.8	3.3	3.3	3.8	0.0

（青点線枠）➡ 任意に変更可能な税率　（赤点線枠）➡ 任意に変更可能な区分（人口密度・混雑度）

（資料）みずほ情報総研作成

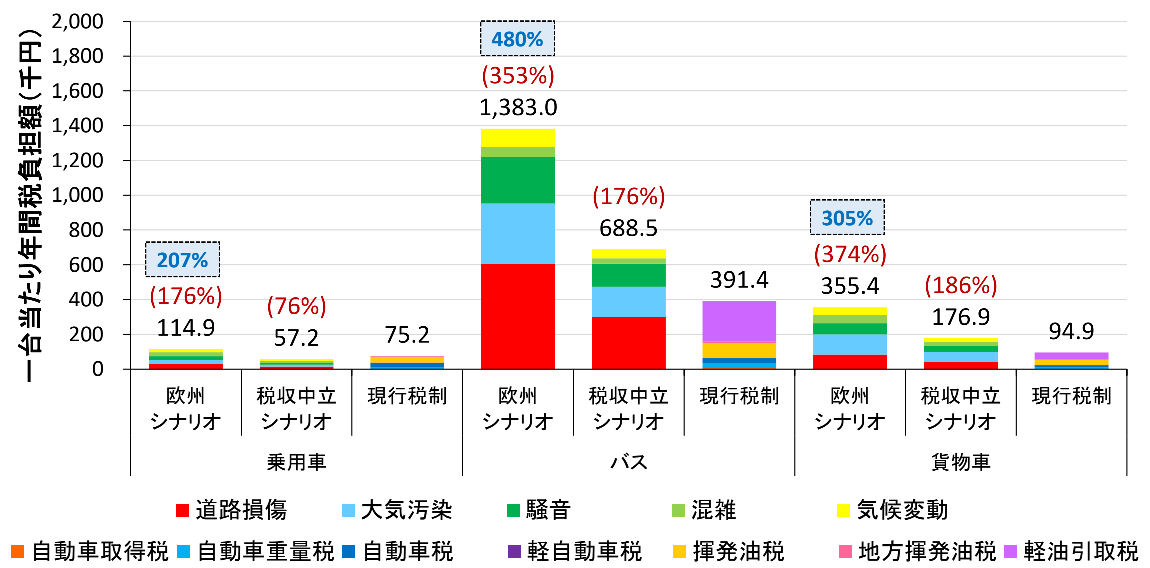
(3)分析結果

図表12は、上記で設定した欧州シナリオ及び税収中立シナリオにおける一台当たりの年間税負担額と、一台当たりの税負担額を推計した結果を車種別に示している。ここでは分析結果を考察しやすくする観点から、乗用車及び貨物車は、軽自動車・小型自動車・普通自動車の保有台数で加重平均することで集約し、乗用車・バス・貨物車の3車種で結果を考察する。

まず、欧州シナリオの結果からツールの挙動を確認する。図表12中の青で示したパーセンテージは、図表7の欧州における現行税制の総収入に対する外部費用総額の割合を再掲したもので、この数値と日本の現行税制に対する欧州シナリオを適用した税負担額の割合を比較する。乗用車の総収入に対する割合はバスや貨物車と比べて低く、バスと貨物車の総収入に対する割合は3～4倍程度と概ね同様の傾向が確認できる。

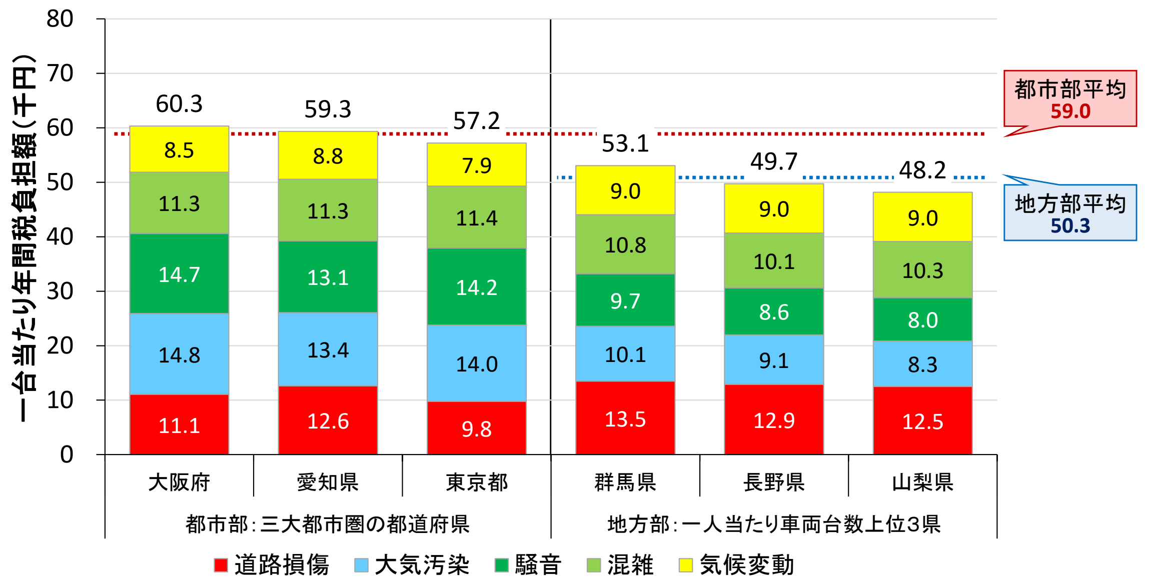
次に、税収中立シナリオの結果を考察する。乗用車の現行税制に対する走行距離課税の税負担額の割合(76%)は100%を下回ることから、仮に現行の自動車関係諸税を廃止して走行距離課税に一本化した場合は実質的な減税になる。一方で、バス(176%)や貨物車(186%)は100%を上回り実質的な増税となる。すなわち、今回の定量的な分析から仮に全体として税収中立であっても、税負担が運送事業者に偏ってしまうという課題が指摘できる。

図表12　日本における車種別の一台当たり年間税負担額の比較



(注1) 青字のパーセンテージは、欧州における現行税制の総収入に対する外部費用総額の割合を再掲(図表7より)。赤字で括弧書きしたパーセンテージは、日本における現行税制の総収入に対する外部費用総額の割合を示す。
(注2) 自動車取得税及び自動車税については、総務省「平成27年度道府県税の課税状況等に関する調」より、軽自動車税については、総務省「平成27年度市町村税課税状況等の調」より車種別の税収額を収集し、自動車交通局技術安全部自動車情報課「自動車保有車両数」の平成27年度末時点の車種別保有台数で除すことで、税目別の一台当たり税負担額を推計。
(注3) 自動車重量税については、車種別に自家用・営業用それぞれの車両重量(貨物車及び乗合車は車両総重量)のシェアを用いて車種別の税収額を推計し、自動車交通局技術安全部自動車情報課「自動車保有車両数」の平成27年度末時点の車種別保有台数で除すことで、一台当たり税負担額を推計。
(注4) 揮発油税、地方揮発油税、軽油引取税については、国土交通省「平成27年度自動車燃料消費量調査」より車種別の燃料消費量を収集し、各税率を乗じて車種別の税収額を推計した上で、自動車交通局技術安全部自動車情報課「自動車保有車両数」の平成27年度末時点の車種別保有台数で除すことで、一台当たり税負担額を推計。
(資料) みずほ情報総研作成

図表13 乗用車における地域別の一台当たり年間税負担額の比較



（資料）みずほ情報総研作成

さらに、税収中立シナリオの結果を都道府県別に分析してみる。三大都市圏である東京都、大阪府、愛知県を都市部として、一人当たり車両台数上位3県である群馬県、長野県、山梨県を地方部として、乗用車における一台当たり年間税負担額の比較を図表13に示す。人口密度の高い区域を多く占める都市部では、大気汚染や騒音による税負担が増加し、一台当たり走行距離が大きい地方部では、気候変動や道路損傷による税負担が増加するが、全体の年間税負担額おいては都市部が地方部を上回っている。

日本自動車工業会のユーザーアンケート(18)によれば、自動車が生活必需品であり、代替交通手段が相対的に乏しく、自動車を保有・利用せざるを得ない地方部のユーザーに自動車関係諸税の税負担のしわ寄せがあるとされている。今回の定量的な分析から、こうした税負担の地域格差を是正し得る税体系の一つとして、自動車利用による外部性に対処するという論拠に基づき、地域性を加味した税率区分を有する走行距離課税が有用であるということが指摘できる。

おわりに

自動車関係諸税は、産業政策の観点では我が国の基幹産業である自動車業界に影響を及ぼし、財制度の観点では地方自治体の貴重な財源でもあり、気候変動の観点では自動車の脱炭素化への移行を促進する政策とも捉えることができる。様々な利害が取り巻く自動車関係諸税が担う役割は多くあるだろう。その中で、ここ数年の自動車業界の変革に伴う新たな技術やサービスを契機として、抜本的な税制改革に向き合わねばならないフェーズに入っている。

本稿では、中長期を見据えた自動車関係諸税の選択肢の一つとして走行距離課税を取り上げた。今回は、欧州委員会を参考に、税収中立の観点から試行的に税率を設定して分析を行ったが、実際に具体的な検討を行う際は、税収中立に加え、特定の車種や地域に税負担が偏らないようにする配慮が欠かせない。また、外部性の選定や税率の設定においては、国として重視すべき問題やその対策コストに応じても異なって

くることから、我が国の自動車を取り巻く状況や行政ニーズを踏まえ、制度設計を慎重に進めていく必要がある。

さらに、走行距離課税の導入に向けては、税収中立以外にも多くの課題がある。本稿では取り上げなかったが、走行データを取得するデバイスの開発、データ管理システムの構築やセキュリティの確保、プライバシーへの配慮など、技術的課題の克服や社会受容性の配慮も必要である。欧州諸国の一部では、貨物車やバスに対象を絞りつつ、走行距離課税の拡大を着実に進めており、そうした知見も整理していく必要がある。

中長期を見据えた理想的な自動車関係諸税の検討にあたっては、そうした実現可能性を踏まえつつ、本稿で示したような定量的な分析に基づき、分析的かつ多面的な政策評価が行われることを期待したい。

注

⑴　自由民主党・公明党（2018）「平成31年度税制改正大綱」

⑵　日本経済新聞「車税制を抜本改革　走行距離で課税、EV やシェア対応（2018/11/27）」
https://www.nikkei.com/article/DGXMZO38237910X21C18A1MM8000/

⑶　産経新聞「自動車税の抜本改革検討へ　走行課税の導入も（2018/12/6）」
https://www.sankei.com/economy/news/181206/ecn1812060032-n1.html

⑷　日本自動車工業会（2019）「令和2年度税制改正に関する要望書」

⑸　日本経済団体連合会（2019）「令和2年度税制改正に関する提言」

⑹　総務省（2013）「自動車関係税制のあり方に関する検討会報告書」

⑺　東京都（2018）「平成30年度東京都税制調査会答申」

⑻　宇沢弘文（1974）「自動車の社会的費用」岩波新書

⑼　兒山真也、岸本充生（2001）「日本における自動車交通の外部費用の概算」*運輸政策研究、Vol.4, No.2, pp.19-30*

⑽　金本良嗣（2007）「道路特定財源制度の経済分析」*日本交通政策研究会、第1章、pp.1-32*

⑾　IEA (2019)「Global EV Outlook 2019」

⑿　Van Dender, K. (2019)「Taxing vehicles, fuels, and road use Opportunities for improving transport tax practice」*OECD Taxation Working Papers No. 44*

⒀　欧州委員会ウェブページ
https://eur- lex.europa.eu/legal- content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:31993L0089&from=EN

⒁　Ministry of Finance（Netherlands）へのヒアリングによる

⒂　Ministry of Infrastructure and Water Management, Netherlands（2019）「Introduction of Heavy Goods Vehicle Charge-On the road to a competitive and sustainable transport sector」

⒃　European Commission（2019）「Assessment of the State of play of Internalisation in the European Transport Sector」

⒄　European Commission（2020）「Handbook on the external costs of transport Version 2019–1.1」

⒅　日本自動車工業会ウェブページ
http://www.jama.or.jp/tax/taxes_ on_ automobiles/2/

社会動向レポート

CO_2有効利用（CCU）の国内外の動向

グローバルイノベーション＆エネルギー部
エネルギービジネスチーム
コンサルタント　野原　珠華

気候変動問題を解決するイノベーション技術として注目を集める「CO_2有効利用（CCU）」について、その概要や課題、最近の政策動向や技術動向、各企業の取り組みなどを紹介する。

1. CCU とは？

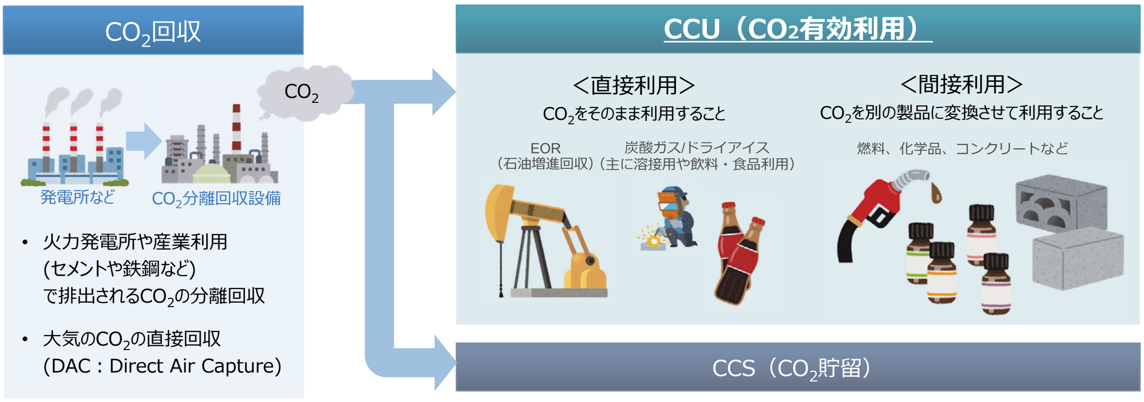
（1）CCU の意義

近年、地球温暖化の原因と言われている二酸化炭素（以下 CO_2）を削減するだけでなく、発電や産業で排出されるCO_2や大気中のCO_2を回収し、回収したCO_2を利用もしくは地中に貯留する技術「CCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）」が注目されている。CCS（Carbon dioxide Capture and Storage：CO_2回収・貯留）は、CO_2を大量に削減できる手段として長年研究されており、最近では年間100万トン以上のCO_2を回収・貯留する大規模プロジェクトも進んでいる。CCS と同様に長年研究されている CCU（Carbon dioxide Capture and Utilization：CO_2回収・利用）も、最近では気候変動問題を解決するイノベーション技術として注目を集めるようになった。

CCU は、従来の化石燃料由来の燃料や化学品等の製品を、CO_2を原料として製造した製品へと置き換えることで低炭素化を図ることができる。さらに、CO_2を耐久性のある素材に変えればCO_2を長期間固定でき、固定している期間はCO_2ゼロ排出といえる。

低炭素化以外にも、国内でCO_2や水素を調達すれば、輸入に頼る石油等の代替品を国内で製造できるようになるため、エネルギー供給の安定化に繋がるメリットがある。また、基本的に

図表1　CCU の概念図



（資料）みずほ情報総研作成

は既存製品の代替品を製造するため、既にあるインフラやサプライチェーンをより低炭素な形で活用できる。さらに、最終的に何かしらの製品が作られるため、販売することで収入が得られたり、様々なステークホルダーを巻き込みながら新たなビジネスを創出する可能性も秘めている。

(2)国内外のCCUに関連する政策動向

CCUは、特に欧州・米国で先進的に取り組まれている。欧州は、2016年に提案した“A Clean Planet for all”で2050年までに正味ゼロエミッションの達成を明示しているが、目標達成に向けた気候変動対策の重要技術として、再生可能エネルギーを利用して水から水素を製造する「Power-to-X技術」が取り上げられている。また、Power-to-X技術で作られた水素をCO_2と反応させて、メタンなどのカーボンニュートラルな代替製品に変換することにも言及されている。特に、エネルギー形態を電気から燃料へ変換することで、産業・運輸分野など、Power-to-X技術の適用分野の拡大を目指しており、コスト削減を目指し実証事業が進められている。米国では、気候変動対策よりもエネルギーセキュリティの観点から幅広いCCUを検討しており、Power-to-X技術以外にも、CO_2と水から太陽エネルギーを活用する形で化学品を合成する人工光合成や、微生物やそれが生産する酵素を用いた変換などの基礎研究を含む研究開発や実証試験が実施され、これらの事業向けの補助金制度も整備されている。

日本では、2019年1月に安倍首相がダボス会議で「経済成長と環境の好循環」を実現するイノベーションとしてCCUへの意欲を示してから、経済産業省がCO_2を炭素資源と捉えて再利用する「カーボンリサイクル」というコンセプトを推進し始めた。同年2月には資源エネルギー庁にカーボンリサイクル室が設置され、6月にはCCU技術の各分野で研究開発が必要な技術的な課題を整理した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」が公表されている。

カーボンリサイクル技術ロードマップでは、ポリカーボネートやバイオジェット燃料、道路ブロックなど、基礎技術が既に確立し水素が不要なものや高付加価値で代替が進みやすいものに関しては2030年頃からの普及を目指し、オレフィンやベンゼン、トルエン、キシレンなどの化学品、燃料、汎用コンクリート製品等、技術は現段階で未確立だが実現した場合CO_2利用量が多いものに関しては2050年頃からの普及を目指し技術開発を進めるとしている。

また、環境省も2018年より「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」を開始し、CO_2資源化を実現するための課題を整理し、炭素循環社会モデルの構築することでCCU普及を目指す事業を進めている。

(3) CCUの主な用途について

CCUは主に「直接利用」と「間接利用」とに大別される（図表2を参照）。直接利用はCO_2をそのまま利用することを、間接利用はCO_2を何らかの製品に変換させて利用することを指す。

直接利用では、CO_2を産業ガスとして溶接用シールドガスや炭酸水などの飲料・食品分野、医療分野で利用したり、ドライアイスにして生鮮食品の冷温保管・輸送などで利用したりする。また、枯渇油田に圧入して油田の残存原油を回収するEOR（Enhanced Oil Recovery）で利用されることも多い。

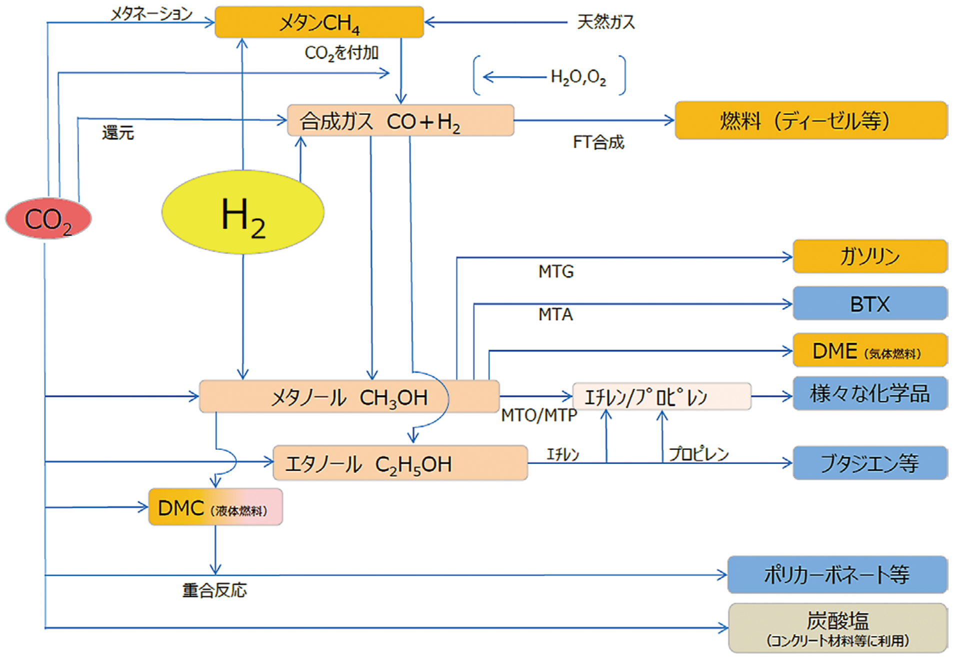
間接利用では様々な物質に変換させて利用する（図表3を参照）。CO_2をメタンやメタノール、エタノール等に変換させて燃料や化学品として利用したり、CO_2を炭酸カルシウムに変換しセメントの原料として利用したりする。また、コ

図表2　CCU の用途と各技術ステージの概観（●が各技術ステージの現時点を表す）

利用方法	用途		研究開発	実証	実用化 / 商用化
直接利用	EOR	石油増進回収			●
	炭酸ガス / ドライアイス	飲料・食品、溶接用シールドガスなどの産業ガス			●
間接利用	化学品・燃料	メタノール、メタンなど		● ※一部商用化	
	（参考）人工光合成	触媒	●	2020年以降	2030年以降
	鉱物	コンクリート、骨材、炭酸塩、重曹など			●
	ポリマー	ポリカーボネートなど			●
	バイオマス由来化学品・燃料	バイオ燃料、天然色素、サプリメント、プロテイン、飼料・肥料など		● バイオ燃料	● 化学品系
	その他	炭素繊維など	●		

（資料）各種文献よりみずほ情報総研作成

図表3　CO_2から化学品・燃料等になるまでのフロー図



（資料）経済産業省「カーボンリサイクル技術ロードマップ」

ンクリート製造時にCO_2を吹き込むことで強度の高いコンクリートに仕上げたり、バイオマス由来の化学品や燃料の原料となる藻類などの成長効率を、CO_2を吹き込むことで向上させたりなど、間接利用における用途は多岐にわたる。

2. 国内外のCCUに関連するビジネスや取り組みの紹介

（1）化学品

CO_2から製造できる化学品およびその基幹物質となるものに、メタノールやエタノールが挙げられる。メタノールやエタノールはそのまま発電用燃料や輸送用燃料として利用したり、エチレンやプロピレン、さらに様々な化学品に合成して利用したりすることができる。

CO_2のメタノールやエタノールへの変換で商業化に至っているプロジェクトは少ないが、アイスランドのCarbon Recycling International（以下CRI）は同国レイキャビク南方で世界初のCO_2からのメタノール生産プラントを2012年から商業稼働している。同企業が運転しているプラントは、地熱発電由来の電力で水電解した水素と、地熱発電の随伴ガスである年間5,500トンCO_2から、年間4,000トンのメタノールを製造して「Vulcanol」という商品名で売り出している。

CRIはCO_2からのメタノールを製造し販売するだけではなく、その製造技術「Emissions-to-Liquids」を普及させる取り組みも行っている。CRIは、欧州における研究および革新的開発を促進するための研究・イノベーション枠組み計画である「Horizon2020」の一環として、180万ユーロ（約2億1,600万円、1ユーロ＝120円で換算）の支援を受け、大規模メタノール生産プラントの商業化を加速し欧州内での再生可能メタノールの市場を拡大していくため、「CirclEnergy」と呼ばれるプロジェクトを進めている。

CRIの市場拡大は欧州内にとどまらない。中国河南順成集團がCRIと技術契約を締結し、中国の河南省安養市にCRIの技術を用いたプラン

図表4　CCUによる化学品製造に関連する取り組みを行う企業例

企業名	所在地	CCU関連の取り組みの概要
Carbon Recycling International（※1、※2）	アイスランド	・世界初のCO_2からのメタノール生産プラントを2012年から商業稼働。年間4,000トンの再生可能メタノールを「Vulcanol」という商品名で販売。 ・メタノール製造技術「Emissions-to-Liquids」を普及。欧州のHorizon2020のもと「Circl Energy」プロジェクトで再生可能メタノール製造の大規模化を進める。 ・上記技術を中国の企業にも提供。
株式会社東芝（※3）	日本	・環境省事業の1つとして、人工光合成の実証事業を行う。水電解による水素と火力発電所の排ガスからのCO_2でメタノールを製造。
三菱日立パワーシステムズ株式会社（※4）	日本	・苫小牧のCO_2回収設備からのCO_2からメタノールを1日20トン合成するプラントを設置することを想定した調査事業を開始。
三菱重工エンジニアリング株式会社（※4）	日本	
三菱ガス化学株式会社（※4）	日本	

（※1）Carbon Recycling International ホームページ（https://www.carbonrecycling.is/）（最終検索日：2020年9月11日）
（※2）Carbon Recycling International 2019年5月22日付プレスリリース（https://www.carbonrecycling.is/news-media/co2-to-methanol-plant-china）（最終検索日：2020年9月11日）
（※3）株式会社東芝「2018年度CCUSの早期社会実装会議　多量二酸化炭素排出施設における人工光合成技術を用いた地域適合型二酸化炭素資源化モデルの構築実証」（http://www.env.go.jp/earth/ccs/ccus-kaigi/2-4_3_CCUS_Utilization_TOSHIBA.pdf）（最終検索日：2020年9月11日）
（※4）三菱重工株式会社 2020年3月31日付プレスリリース　https://www.mhi.com/jp/news/story/20033102.html（最終検索日：2020年9月11日）

（資料）みずほ情報総研作成

トを建設するという。このプロジェクトの総費用は約9,000万米ドル(約96億円、1米ドル＝107円で換算)と見積もられており、年間約15万トンのCO_2から年間約18万トンのメタノールとLNGを製造する予定である。

日本でもCO_2からメタノールを製造するプロジェクトが始まっている。1-(2)政策動向で述べた環境省の事業において、株式会社東芝が太陽光発電による水電解から製造した水素と火力発電所の排ガスからのCO_2でメタノールを製造する人工光合成の実証事業を2018年より開始している。また、三菱日立パワーシステムズ株式会社、三菱重工エンジニアリング株式会社、三菱ガス化学株式会社は、苫小牧にあるCO_2回収設備からのCO_2と、製油所から発生する副生水素と水電解装置により発生させた水素を原料として、メタノールを1日20トン合成するプラントを設置することを想定した調査事業を2020年3月より始めている。

(2)燃料

CO_2は、メタネーションと呼ばれる技術によって水素と反応させてメタンに変換させたり、還元反応によって合成ガス(COと水素の混合ガスのこと)を製造させたりすることができる。合成ガスは、フィッシャー・トロプシュ合成と呼ばれる反応によって、軽油やアルコール、オレフィンといった製品へと変換することができる。メタンはそのまま都市ガスとして、軽油はそのまま輸送用燃料として利用できるなど、CO_2から既存製品の代替品を作ることは、既にあるインフラやサプライチェーンを有効活用できる面で大きなメリットがあるといえる。

海外でも上記のメリットに注目して、各国でメタネーション技術開発が進んでいる。その代表例として「Store&Go」プロジェクトが挙げられるが、Horizon2020の支援を受け27機関が欧州内の3地点においてPower-to-Gasの実証を行うプロジェクトである。プロジェクト期間は約4年間であり、総事業費は2,800万ユーロ(約33億円)に上り、ドイツのFalkenhagen、スイスのSolothurn、イタリア南部のTroiaに実証サイトが設けられている。本プロジェクトの目的は、「パリ協定」の目標達成に向け、メタネー

図表5 CCUによる燃料製造に関連する取り組みを行う企業・プロジェクト例

企業・プロジェクト名	所在地	CCU関連の取り組みの概要
Store&Go(プロジェクト)(※5)	ドイツ スイス イタリア	・Horizon2020のもと、27機関がP2Gの実証を行うもの。実証サイトはドイツのFalkenhagen、スイスのSolothurn、イタリア南部のTroiaに設けられている。それぞれの地域特性に合わせた再エネやCO_2の調達をしている。
国際石油開発帝石株式会社(※6)	日本	・自社のガス田で排出されているCO_2からメタンを製造し、都市ガスとして再利用する国内初の事業を2019年より始めた。年間50トンのメタンを都市ガスに混ぜ家庭や産業向け供給する構想となっている。
日立造船株式会社(※7)	日本	・メタネーション装置を保有。 ・環境省の事業の1つとして、清掃工場の排ガスからのCO_2と再エネを利用した水電解による水素でメタンを製造する実証事業を行っている。

(※5) Store&Go ホームページ　https://www.storeandgo.info/(最終検索日：2020年9月11日)
(※6) 国際石油開発帝石株式会社 2019年10月16日付プレスリリース　https://www.inpex.co.jp/news/assets/pdf/20191016.pdf (最終検索日：2020年9月11日)
(※7) 日立造船株式会社「2018年度CCUSの早期社会実装会議　日立造船株式会社におけるCCU事業の取組」(http://www.env.go.jp/earth/ccs/ccus-kaigi/2-4_1_CCUS_Utilization_Hitz.pdf)(最終検索日：2020年9月11日)

(資料) みずほ情報総研作成

ションを含むPower-to-Gasのビジネスモデルを確立して商用化を加速することである。このプロジェクトの特徴は、それぞれの地域特性に合わせた再エネやCO_2の調達をしているところで、例えば、スイスの実証サイトではアルプス地域の太陽光・水力発電の電力を活用し、イタリアの実証サイトでは地中海沿岸地域の風力発電などの電力をメタネーションに活用している。

国内でも、メタネーションの事業が始動している。国際石油開発帝石株式会社は、自社のガス田で排出されているCO_2からメタンを製造し、都市ガスとして再利用する事業を2019年より始めた。CO_2を再利用し都市ガスの原料製造を事業化するのは、国内では初めてであり、2019年8月に年間50トンの生産を開始しており、このメタンを都市ガスに混ぜ既存のガス導管経由で家庭や産業向け供給する構想となっている。

メタネーション装置は日立造船株式会社の技術で、1-（2）政策動向で述べた環境省の事業において、2018～2022年度の期間で、清掃工場の排ガスからのCO_2と再エネを利用した水電解によって作られる水素でメタンを製造する実証事業を行い、メタネーション技術のモデル実証を行っている。

（3）コンクリート

セメント業界におけるCCUは、CO_2をセメントの原料の石灰石の主成分である炭酸カルシウムに変換したり、コンクリート製造時にCO_2を吹き込むことで強度の高いコンクリートに仕上げたりなど、化学品や燃料と違い水素やCO_2を変換させるための多量のエネルギーが不要である大きなメリットがある。そのため、様々な企業が上記技術やそれら技術によって作られる商品を開発している。

カナダのスタートアップ企業CarbonCure Technologiesは、2007年に設立されて以来、セメント製造で炭酸カルシウムを焼成する際に大量に排出されるCO_2をリサイクルしてコンクリートに注入する事業に取り組んでいる。同社は、既にコンクリート製造を行っている工場に追加で導入することができるため、従来の製造過程を変えることなくCO_2削減対策ができるというメリットを打ち出している。

国内では、鹿島建設株式会社が「CO_2-SUICOM®」というCCUによって製造されたコンクリートを商品化している。CO_2-SUICOM®は鹿島建設株式会社、中国電力株式会社、デンカ株式会社、ランデス株式会社が共同開発した

図表6　CCUによるコンクリート製造に関連する取り組みを行う企業例

企業名	所在地	CCU関連の取り組みの概要
CarbonCure Technologies（※8）	カナダ	・セメント製造で炭酸カルシウムを焼成する際に大量に排出されるCO_2をリサイクルしてコンクリートに注入する事業に取り組む。コンクリートの従来の製造過程を変えることなくCO_2削減対策ができるというメリットを打ち出している。
鹿島建設株式会社（※9）	日本	・「CO_2-SUICOM®」というCCUによって製造されたコンクリートを商品化している。CO_2-SUICOM®は、特殊混和材によりCO_2高濃度下でCO_2を強制的に吸収・反応させ製造したコンクリート。既存のものに比べて大幅なCO_2排出量の削減効果が得られる。

（※8）CarbonCure Technologies ホームページ　https://www.carboncure.com/（最終検索日：2020年9月11日）
（※9）鹿島建設株式会社「環境配慮型コンクリート「CO_2-SUICOM®（シーオーツースイコム）」」 https://www.kajima.co.jp/tech/c_eco/co2/index.html#!body_02（最終検索日：2020年9月11日）

（資料）みずほ情報総研作成

コンクリートで、コンクリートの主原料であるセメントの一部を、CO_2と反応することでコンクリートを緻密化・硬化させる性質を持つ特殊混和材と置き換え、CO_2高濃度下でCO_2を強制的に吸収・反応させコンクリートを製造する。そのため、既存のコンクリートに比べて大幅なCO_2排出量の削減効果が得られるという。CO₂-SUICOM® は、舗装ブロックやフェンス基礎など土木分野の外構材料や、建物の天井など建築分野でも既に利用されている。

(4)ポリマー

CO_2を原料としてポリマーを生成する技術は大学および企業で様々な技術の研究開発が進んでいる。CO_2から生成されるポリマーは、主に温度によって液体または固体に形状を変化させることができる熱可塑性樹脂が多く、使い捨て容器などの汎用プラスチックとして利用されるポリエチレンや、電気・電子部品や衣料用繊維などの工業用プラスチックとして利用されるポリカーボネートなど、身近にある様々な製品での利用が期待できる。

海外では既にCCUのポリマーを商用化している企業がある。ドイツの化学メーカーCovestro AGは、同国ドルマゲンでCO_2とプロピレンオキシドを反応させてポリマー原料であるポリオールを年間5,000トン生産している。ポリオールは、装飾品、スポーツ用品、自動車部品など、多くの日用品に使われるポリウレタンの製造に使用される。Covestro AGのCO_2を原料として生成されたポリオールとポリウレタンは、石油ベースで製造される既存のものと同程度の品質を満たしているという。

国内でも旭化成がCO_2を原料にポリマーを製造する実証事業を2014年度～2016年度に行っていた。事業の主目的はポリカーボネートを毒性の強いホスゲンを使わずに安全なCO_2を原料に製造することだったが、実証の過程で従来の製造プロセスに比べて省エネかつCO_2排出量削減を実現できることが示されている。

(5)バイオマス由来製品

CO_2を微細藻類などのバイオマスに吸収させ光合成を促進させることで増殖させ、それらを原料に燃料や化学品に変換させる技術もCCUの一つとして考えられている。欧州・米国でもバイオマス関連の研究や商品開発を行う企業は多くあるが、本節では佐賀市における取り組みを紹介したい。

佐賀市では、廃棄物がエネルギーや資源として価値を生み出しながら循環する都市「バイオマス産業都市さが」というコンセプトを進めて

図表7 CCUによるポリマー製造に関連する取り組みを行う企業例

企業名	所在地	CCU関連の取り組みの概要
Covestro AG (※10)	ドイツ	・ドルマゲンでCO_2とプロピレンオキシドを反応させてポリマー原料であるポリオールを年間5,000トン生産。CO_2を原料として生成されたポリオールとポリウレタンは、石油ベースで製造される既存のものと同程度の品質を満たしているという。
旭化成株式会社 (※11)	日本	・CO_2を原料にポリカーボネートを製造する実証事業を2014年度～2016年度に行っていた。

（※10）Covestro AG "CO_2 as a raw material" https://www.covestro.com/en/company/strategy/attitude/co2-dreams（最終検索日：2020年9月11日）

（※11）旭化成株式会社 2017年8月7日付プレスリリース https://www.asahi-kasei.co.jp/asahi/jp/news/2017/ch170807.html（最終検索日：2020年9月11日）

（資料）みずほ情報総研作成

図表8　CCU によるバイオマス由来製品製造に関連する取り組みを行う企業例

企業名	所在地	CCU 関連の取り組みの概要
佐賀市（※12）	日本	・廃棄物がエネルギーや資源として価値を生み出しながら循環する都市「バイオマス産業都市さが」というコンセプトを進めている。 ・その取り組みの1つとして清掃工場の排ガスから CO_2を分離回収し、その CO_2を利用する事業を進めている。
株式会社アルビータ（※13）	日本	・佐賀市の回収した CO_2をヘマトコッカスという微細藻類の培養生産に利用している。ヘマトコッカスから抽出するアスタキサンチンから、サプリメントとスキンケア商品の販売を2019年より開始している。
グリーンラボ株式会社（※14）	日本	・佐賀市の CO_2と、清掃工場からの廃熱を利用し、バジル生産を行う植物工場（スマートアグリファクトリー）を2019年7月より本格稼働している。

（※12）佐賀市ホームページ「二酸化炭素分離回収設備について」 https://www.city.saga.lg.jp/main/44494.html（最終検索日：2020年9月11日）
（※13）株式会社アルビータホームページ　https://www.alvita-saga.com/（最終検索日：2020年9月11日）
（※14）グリーンラボ株式会社 2019年6月27日付プレスリリース　https://green-lab.co.jp/2019-06-27_SAGASAF.pdf（最終検索日：2020年9月11日）

（資料）みずほ情報総研作成

おり、その取り組みの1つとして清掃工場の排ガスから CO_2を分離回収し、その CO_2を利用する事業を進めている。

回収した CO_2は現在、株式会社アルビータが行う藻類培養事業と、グリーンラボ株式会社が行うバジル栽培事業で利用されている。株式会社アルビータは、CO_2をヘマトコッカスという微細藻類の培養生産に利用している。ヘマトコッカスからは老化の原因になる活性酸素を抑制する働きがあるアスタキサンチンを抽出でき、サプリメントとスキンケア商品の販売を2019年より開始している。グリーンラボ株式会社は、清掃工場からの CO_2と、同じく清掃工場からの廃熱を利用し、バジル生産を行う植物工場（スマートアグリファクトリー）を2019年7月より本格稼働している。

佐賀市での事業は、CO_2を有効活用することでその地域に新たな産業が生み出されており、CCU による CO_2削減への貢献だけでなく、周辺の地域活性化にもつながっている意義が大きいと考えられる。

3. おわりに

2章で様々な CCU に関連するビジネスや取り組みを紹介したが、CCU にはまだ課題が多い。

1つ目は経済性である。CCU は、CO_2を使って製造した製品を最終的に商品として売れるため収入が期待できるものの、製造コストが高く、既存製品にコスト面での優位性を持つことが難しい。コストダウンを図るなら、CO_2分離回収コストや水素調達コスト、その他製造コストなどにおけるコスト削減が必要となる。

なお、海外では個人の環境対策への意識に注目し、出資を促すビジネスに取り組む企業がある。大気中の CO_2を直接回収する技術（Direct Air Capture：DAC）を保有するスイスの企業 Climeworks は、世界で初めて DAC で回収した CO_2の地中鉱物への固定に対して個人が出資できるサービスを商用化している。出資額は月7ユーロ（約840円）からで、CO_2は1人年間85kg から600kg まで回収でき、個人のカーボンフットプリントの削減や、長時間のフライトで発生する CO_2を代わりにこのサブスクリプションで削

減できることを商品価値として売り出している。今後、企業だけではなく個人の気候変動問題に対する意識が高まっていくことも考えられ、単なる「コスト」だけではなく「環境価値」も含めて経済性を評価すると、ビジネスとして成り立つ可能性があると考えられる。

2つ目の課題としてはライフサイクルにおける CO_2収支やエネルギー収支である。CO_2は安定した物質であり、一般的に変換に大量のエネルギーを必要とするため、化石燃料由来のエネルギーを使用した場合、CO_2排出量が増加する可能性がある。また、ドライアイスや炭酸ガスとしての利用は、他の CO_2排出活動を代替することができず、短期間で CO_2が大気に放出されるため温暖化対策としての意義は低い。

CCU は、大量に存在し排出削減のニーズの高まっている CO_2を資源にできるため魅力的なオプションである一方、サプライチェーン全体のライフサイクルで評価して CO_2が削減されているのか、必要なエネルギーを低炭素かつ安定的にどのように調達するのか、コスト競争力があるか等を見極める必要がある。適切に CO_2を有効利用できれば、飛行機や船舶といった電化が難しいところや製造プロセスで CO_2の排出が避けられないところなど、省エネルギー対策や再生可能エネルギーの利用だけでは気候変動への対応が難しいところを補う役目を、CCU が担っていくことができると考えられる。

参考文献

1. 環境省「2018年度 CCUS の早期社会実装会議　環境省 CCUS 事業の概要」
http://www.env.go.jp/earth/ccs/ccus-kaigi/1-2_MOE_CCUS_gaiyo.pdf（最終検索日：2020年9月11日）
2. European Commission "A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy (2018)"（最終検索日：2020年9月11日）
3. U.S.Department of Energy "Carbon Capture, Utilization, and Storage: Climate Change, Economic Competitiveness, and Energy Security (2016)"
4. 経済産業省「カーボンリサイクル技術ロードマップ」
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/01/f34/Carbon%20Capture%2C%20Utilization%2C%20and%20Storage--Climate%20Change%2C%20Economic%20Competitiveness%2C%20and%20Energy%20Security_0.pdf（最終検索日：2020年9月11日）
5. Carbon Recycling International ホームページ
https://www.carbonrecycling.is/（最終検索日：2020年9月11日）
6. Carbon Recycling International 2019年5月22日付プレスリリース
https://www.carbonrecycling.is/news-media/co2-to-methanol-plant-china（最終検索日：2020年9月11日）
7. 株式会社東芝「2018年度 CCUS の早期社会実装会議　多量二酸化炭素排出施設における人工光合成技術を用いた地域適合型二酸化炭素資源化モデルの構築実証」
http://www.env.go.jp/earth/ccs/ccus-kaigi/2-4_3_CCUS_Utilization_TOSHIBA.pdf（最終検索日：2020年9月11日）
8. 三菱重工株式会社 2020年3月31日付プレスリリース
https://www.mhi.com/jp/news/story/20033102.html（最終検索日：2020年9月11日）
9. Store&Go ホームページ
https://www.storeandgo.info/（最終検索日：2020年9月11日）
10. 国際石油開発帝石株式会社 2019年10月16日付プレスリリース
https://www.inpex.co.jp/news/assets/pdf/20191016.pdf（最終検索日：2020年9月11日）
11. 日立造船株式会社「2018年度 CCUS の早期社会実装会議　日立造船株式会社における CCU 事業の取組」
http://www.env.go.jp/earth/ccs/ccus-kaigi/2-4_1_CCUS_Utilization_Hitz.pdf（最終検索日：2020年9月11日）
12. Carbon Cure Technologies ホームページ
https://www.carboncure.com/（最終検索日：2020年9月11日）
13. 鹿島建設株式会社「環境配慮型コンクリート「CO_2-SUICOM®（シーオーツースイコム）」」
https://www.kajima.co.jp/tech/c_eco/co2/index.html#!body_02
14. Covestro AG "CO_2 as a raw material"
https://www.covestro.com/en/company/strategy/attitude/co2-dreams（最終検索日：2020年9月11日）
15. 旭化成株式会社 2017年8月7日付プレスリリース
https://www.asahi-kasei.co.jp/asahi/jp/news/2017/ch170807.html

16. 佐賀市ホームページ「二酸化炭素分離回収設備について」
https://www.city.saga.lg.jp/main/44494.html（最終検索日：2020年9月11日）
17. 株式会社アルビータホームページ
https://www.alvita-saga.com/（最終検索日：2020年9月11日）
18. グリーンラボ株式会社 2019年6月27日付プレスリリース
https://green-lab.co.jp/2019-06-27_SAGASAF.pdf（最終検索日：2020年9月11日）
19. Climeworks ホームページ
https://www.climeworks.com/（最終検索日：2020年9月11日）

社会動向レポート

職場における化学物質管理に関する国内外の動向

環境エネルギー第2部
コンサルタント 後藤 嘉孝

近年、国内外では職場における化学物質管理のためのさまざまな制度や支援ツールが展開されている。本稿では、国内外の職場における化学物質のリスクアセスメントの支援ツールの現状や特徴を概観するとともに、欧州おける緊急時(中毒等)における化学物質の取扱い方法等に関する新たな届出制度(緊急の健康対応に関係する調和化された情報に関する付属書VIIIの追加)の概要と今後を展望する。

はじめに

我が国において、2016年7月1日より改正労働安全衛生法(以下、「安衛法」という。)が施行され、一定のリスクがある化学物質について、事業者に危険性又は有害性等の調査(以下、「リスクアセスメント」という。)が義務付けられた。

事業者は、一定の危険有害性を持つ化学物質(ラベル・SDS [(1)] 交付義務対象673物質)について、業種や規模、取扱い状況を問わず、リスクアセスメントを実施しなければならない。そのため、各事業場はそれぞれ工夫をしながらリスクアセスメントを進めつつある状況にある。一方で、厚生労働省はリスクアセスメントの普及・促進のために、より効率的・効果的にリスクアセスメントが実施できる支援ツールを順次提供している。

また、欧州においては、欧州における化学物質の総合的な制度であるREACH(化学品の登録、評価、認可及び制限に関する規則)におけるリスクアセスメント実施のために、各種リスクアセスメント支援ツールが開発・改良されているほか、欧州における化学品の分類、ラベル表示、包装・梱包に関する規則(CLP 規則)[(2)] において、化学物質の取扱いにおける緊急時の対応に向けた製品(混合物)の新たな届出制度が2021年より開始される。

本稿では、厚生労働省委託事業において当社で開発した化学物質のリスクアセスメントツールを中心に、各種リスクアセスメントツールの特徴及び使い方について述べるほか、CLP 規則に基づき取組みが進められている中毒センター [(3)] への届出制度の概要を紹介する。

1. 国内外における化学物質のリスクアセスメント支援ツールの状況

厚生労働省「化学物質等による危険性又は有害性等の調査等に関する指針(平成27年9月18日付け公示第3号)(以下、「指針」という。)」においては、様々な化学物質のリスクアセスメントの方法が示されており、化学物質の実際の気中濃度を測定し、リスクを見積もる実測法やソフトウェアによってリスクを見積もる推定法が挙げられている。

このうち、推定法のツールの一つとして、新たに2017年3月に登場したのが「CREATE-

図表1　国内外における化学物質のリスクアセスメント支援ツールの特徴比較

ツール名	CREATE-SIMPLE	ECETOC TRA	STOFFENMANAGER
ツールの形式	Microsoft EXCEL	Microsoft EXCEL	WEB ツール
対象	吸入、経皮、危険性(爆発・火災)	吸入、経皮	吸入、経皮
言語	日本語	英語	英語、オランダ語、ドイツ語、フィンランド語、スウェーデン語、ポーランド語、スペイン語、フランス語、イタリア語、デンマーク語
入力項目(吸入・経皮)	・(液体)沸点／(固体)飛散性 ・取扱量 ・含有率 ・スプレー作業の有無 ・塗布作業の有無 ・換気条件 ・作業時間 ・作業頻度 ・呼吸用保護具 ・皮膚への接触面積 ・化学防護手袋 ・手袋の着用に関する教育状況	・プロセスカテゴリ(PROC) ・使用タイプ ・形状 ・(液体)蒸気圧／(固体)飛散性 ・作業時間 ・換気条件 ・呼吸用保護具 ・含有率 ・化学防護手袋	・形状 ・作業内容 ・(液体)蒸気圧／(固体)飛散性 ・粉じんが排出されるタイプ(石、木) ・含有率 ・作業カテゴリ ・作業時間 ・作業頻度 ・換気条件 ・作業者との距離 ・2次発生源の有無 ・部屋の大きさ ・呼吸用保護具 ・清掃状況 ・機器・装置の点検状況
入力項目(爆発・火災)	・着火源の有無 ・近傍における水の取扱い ・近傍における有機物の取扱い	—	—
コスト	無償	無償	35物質まで無料
その他特徴	化学物質の有害性情報・性状等の自動入力機能あり	有害性は手動で入力する必要がある 環境及び消費者へのリスクも同じツールで評価可能	有害性は手動で入力する必要がある 商品をデータベースとして登録可能
作成元	厚生労働省(委託先：みずほ情報総研株式会社)	欧州化学物質生態毒性および毒性センター（ECETOC)	オランダ社会問題雇用省(委託先：TNO、Arbo Unie、BECO(EY))
URL	https://anzeninfo.mhlw.go.jp/user/anzen/kag/ankgc07_3.htm	http://www.ecetoc.org/tools/targeted-risk-assessment-tra/	https://stoffenmanager.com/

（資料）みずほ情報総研作成

SIMPLE（クリエイト・シンプル)」である。

また、諸外国においては、REACH 登録の標準ツールとして REACH CSA ガイダンスに記載されている、ECETOC TRA、STOFFENMANAGER などがよく用いられている。

それぞれの特徴の比較は図表1の通りであり、いずれのツールもほぼ同様の入力項目が網羅さ

れているため、事業者の状況に併せて適切なツールを選択できる。特にCREATE-SIMPLEでは化学物質の有害性情報・性状等の自動入力機能が備わっており、事業者の情報収集の負荷を軽減する機能が備わっている。

一方、事業者がこれらの推定ツールを用いる場合、その「精度」がどの程度あるのかが重要となる。そこで、実測値データがある図表2の条件でばく露の推定を行い、実測値と比較を行った。比較結果は図表3の通り。

図表3の結果より、実測値は同じ作業であっても「いつ測定をするか」、「誰を測定をするか」によって最大約3倍程度の濃度のばらつきが出る可能性[(4)]があるため、いずれのツールについても推定値は、実測値の濃度のばらつきの範囲に含まれている（＝実測値に近い結果）と解釈で

図表2　実測を行った作業条件

項目	内容
対象物質	n-ヘキサン
用途	試験分析用の試薬としての使用（溶媒として使用）
作業	分析、試験又は研究の作業（抽出・洗浄）
ばく露作業従事者数	3～4人
使用量	18L／日
換気設備	局所排気装置（3800m^3/h）
作業位置の風速	0.5～0.7m/s
ばく露作業への従事時間	月40時間以上／月 （ツールへの入力にあたっては、2時間／日×5日／週とした）
作業場面積（容積）	40m^2（100m^3）

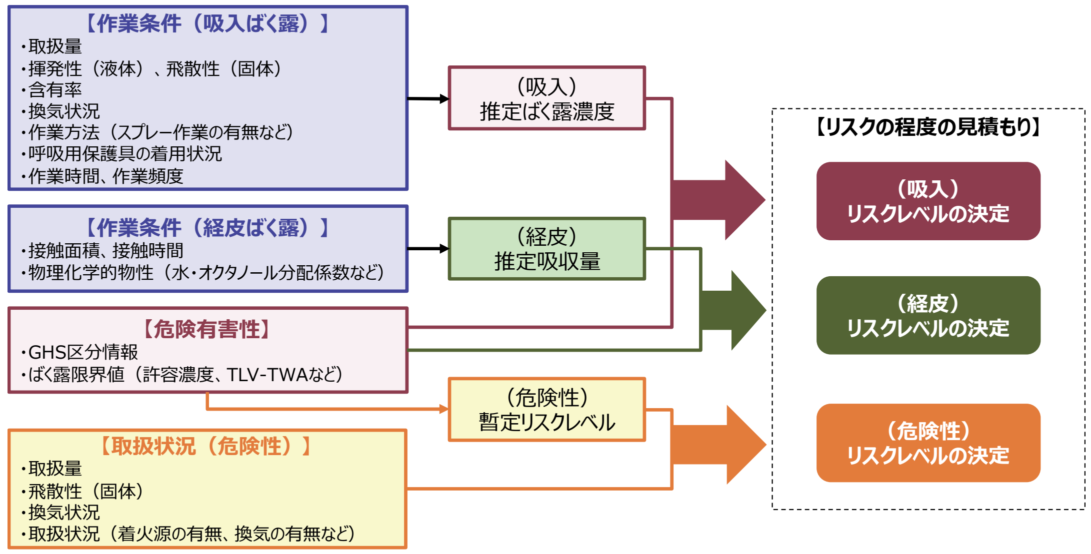
（資料）村井政志、馬場左起子「実験室等の有害物少量取扱い作業場におけるばく露評価のための各種気中濃度測定方法の活用—自律的管理のためのばく露濃度の推定—」労働安全衛生研究、Vol. 3, No.2, pp.129-136（2010年）における「表1各作業場のばく露作業の整理」より、作業条件を一部抜粋。

図表3　各ツールにおけるばく露の推定値及び実測値の比較結果

手法	項目	結果	条件等
推定法	CREATE-SIMPLE	5～50ppm	換気レベルD（外付け式局所排気装置）
	ECETOC TRA	6ppm	PROC15_小規模の研究施設での試薬用途 プロフェショナル LEV有りの室内
	STOFFENMANAGER	46ppm	PROC15_小規模の研究施設での試薬用途
実測法	実測値（1）	30ppm	個人サンプラー測定（8時間）
	実測値（2）	22ppm	個人サンプラー測定（8時間）

（資料）村井政志、馬場左起子「実験室等の有害物少量取扱い作業場におけるばく露評価のための各種気中濃度測定方法の活用—自律的管理のためのばく露濃度の推定—」労働安全衛生研究、Vol. 3, No.2, pp.129-136（2010年）における「表2」及び「表3-1」におけるn—ヘキサンの個人サンプラーによる測定値。推定法の結果は、みずほ情報総研が各ツールを用いてばく露濃度を推定。実験条件の入力にあたって判断が必要な場合には、条件等に記載の条件で各ツールに入力した。

図表4　CREATE-SIMPLE のリスク判定の方法



（資料）「CREATE-SIMPLE マニュアル」より抜粋

きる。よって、これらの推定ツールを用いることによって、簡単かつ精度よく、ばく露の情報を得ることができると言える。

2. 簡易な化学物質のリスクアセスメントツール「CREATE-SIMPLE」について

ここでは、ECETOC TRA、STOFFENMANAGER と同様の精度かつ簡単に評価が実施できると考えられる CREATE-SIMPLE について紹介する。

CREATE-SIMPLE（Chemical Risk Easy Assessment Tool, Edited for Service Industry and MultiPLE workplaces；クリエイト・シンプル）は、サービス業など幅広い業種にむけた簡単な化学物質リスクアセスメントツールであり、2017年に厚生労働省より公開され、2018年には経皮及び危険性のリスクを見積もる機能が追加された。

CREATE-SIMPLE は、化学物質の健康影響については、「危険有害性」と「推定ばく露濃度及び推定吸収量」より、危険性については、物質固有の「危険性有害性」及び「取扱状況」よりリスクを判定するものである。

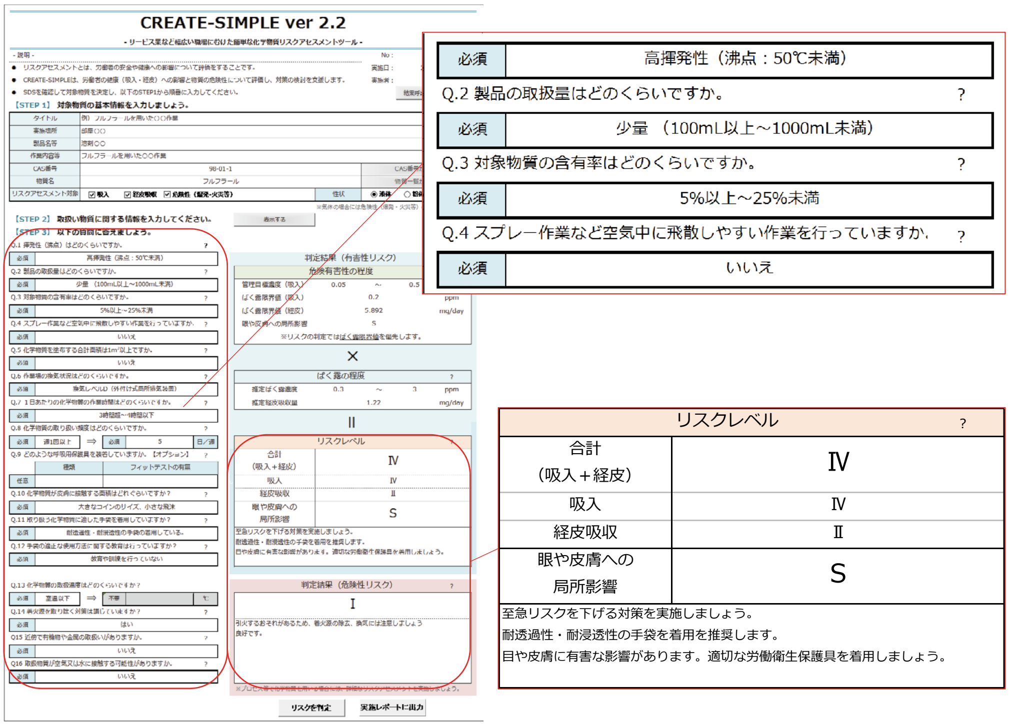
リスク判定の具体的な論理や詳細な操作方法は「設計基準」及び「マニュアル」に掲載されているため割愛するが、「吸入」「経皮」及び「危険性(爆発・火災)」について、16種類の質問に答えていくだけで、リスクを判定することができる。(図表5、図表6)

最初はやや16種類の質問を選択するのに時間を要するかもしれないが、慣れてくれば1物質あたり短時間(数分程度)でリスクの判定を行うことができるという事業者からの声も多い。

さらに、実施したリスクアセスメント結果を見やすく表示できる「実施レポート」では、リスクが高い場合など、リスクを検討したい場合には、「対策後」の欄を用いて Q1～Q16の作業条件を任意に変更し、その場でリスクアセスメントを再実施し、「現状」と比較できる(図表7)。

リスクアセスメント再実施結果を保存して

図表5 CREATE-SIMPLE の入力画面



（資料）みずほ情報総研にて作成。リスクレベルはⅠ（小さい）～Ⅳ（大きい）の4段階で判定される。

図表6 CREATE-SIMPLE の質問項目一覧

Q	質問
1	（液体）沸点は何℃ですか？ （粉体）どのような形状ですか？
2	1回あたりどのくらいの量を使用していますか？
3	製品中における対象物質の含有率はどのくらいですか。
4	スプレー作業など空気中に飛散しやすい作業を行っていますか。
5	化学物質を塗布する合計面積は1m^{2}以上ですか。
6	作業場の換気状況をどのくらいですか。
7	1回あたりの化学物質を取扱時間はどのくらいですか。
8	化学物質を取扱頻度はどのくらいですか。
9	どのような呼吸用保護具を装着していますか。【オプション】
10	化学物質が皮膚に接触する面積はどれぐらいですか？
11	取り扱う化学物質に適した手袋を着用していますか？
12	手袋の適正な使用方法に関する教育は行っていますか？
13	化学物質の取扱温度はどのくらいですか？
14	着火源を取り除く対策は講じていますか？
15	近傍で有機物や金属の取扱いがありますか？
16	取扱物質が空気又は水に接触する可能性がありますか？

（資料）みずほ情報総研にて作成

図表7　CREATE-SIMPLE におけるリスク低減対策の検討画面

	項目	現状	対策後
有害性	管理目標濃度（吸入）	0.05　～　0.5	0.05　～　0.5
	ばく露限界値（吸入）	0.2	0.2
	ばく露限界値（経皮）	5.892	5.892
	目や皮膚に有害な影響	S	S
	Q1.揮発性・飛散性	高揮発性（沸点：50℃未満）	高揮発性（沸点：50℃未満）
	Q2.取扱量	少量　（100mL以上～1000mL未満）	少量　（100mL以上～1000mL未満）
	Q3.含有率	5%以上～25%未満	5%以上～25%未満
	Q4.スプレー作業の有無	いいえ	いいえ
	Q5.塗布面積1m²超	いいえ	いいえ
	Q6.換気レベル	換気レベルD（外付け式局所排気装置）	換気レベルE（囲い式局所排気装置）
	Q7.作業時間	3時間超～4時間以下	3時間超～4時間以下
	Q8.作業頻度	5 日／週	5 日／週
	Q9.呼吸用保護具[任意]		防毒マスク（半面型）
	フィットテストの方法		簡易法（フィットチェック）
経皮	Q10.接触面積	大きなコインのサイズ、小さな飛沫	大きなコインのサイズ、小さな飛沫
	Q11.化学防護手袋	耐透過性・耐浸透性の手袋の着用している。	耐透過性・耐浸透性の手袋の着用している。
	Q12.保護具の教育	教育や訓練を行っていない	教育や訓練を行っていない
爆発・火災	Q13.取扱温度	室温以下	室温以下
	Q14.着火源の有無	はい	はい
	Q15.有機物、金属の取扱い	いいえ	いいえ
	Q16.空気、水との接触	いいえ	いいえ
	推定ばく露濃度	0.3　～　3	0.0045　～　0.045
	推定経皮吸収量[mg]	1.24	1.24
リスク	合計（吸入＋経皮）	Ⅳ	Ⅱ
	吸入	Ⅳ	Ⅱ
	経皮吸収	Ⅱ	Ⅱ
	眼や皮膚への影響	S	S
	爆発火災	Ⅰ	Ⅰ
	リスクレベル（有害性）の説明	至急リスクを下げる対策を実施しましょう。耐透過性・耐浸透性の手袋を着用を推奨します。目や皮膚に有害な影響があります。適切な労働衛生保護具を着用しましょう。	作業環境は良好です。換気、機器や器具、作業手順などの管理に努めましょう。耐透過性・耐浸透性の手袋を着用を推奨します。目や皮膚に有害な影響があります。適切な労働衛生保護具を着用しましょう。
	リスクレベル（危険性）の説明	引火するおそれがあるため、着火源の除去、換気には注意しましょう	引火するおそれがあるため、着火源の除去、換気には注意しましょう

（資料）みずほ情報総研にて作成

CREATE-SIMPLE によるリスクアセスメントが終了となる。このように、専門的な訓練がなくとも容易に使えるツールとなっている。

CREATE-SIMPLE は、入力する情報量が豊富であり、作業場の条件を適切に反映できること、リスク判定の精度が高いこと、及びツールが非常に使いやすいことが特徴であり、中小企業から大企業まで、様々な企業に用いられている。

3. CLP 規則に基づく中毒センターへの届出制度

2017年3月22日に欧州CLP規則の改正が行われ、製品をEU域内に上市する事業者（主に輸入者と川下ユーザー）が、危険有害性があると分類された混合物の情報を中毒センター（Poison centres）に対して、欧州における共通様式で情報提供を義務付けることとなった。

図表8 事業者が中毒センターに提供すべき情報の要件

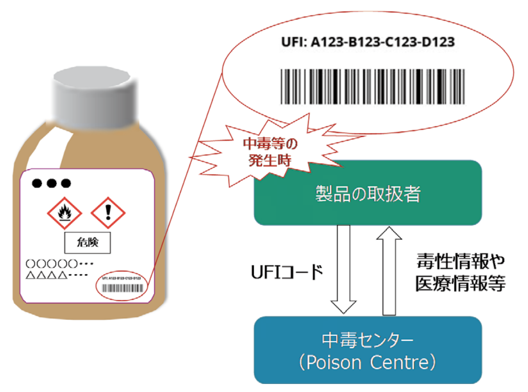
項目	詳細
問合せ先	申請者の情報 申請者よりも詳細な情報を持っているコンタクト先 緊急時のコンタクト先
混合物の情報	製品／混合物の識別子 毒性情報 有害性の分類および表示 物理化学的性状
混合物の組成	それぞれの構成成分について －含有率 －識別子 －分類
UFI 及びその他の識別子	unique formula identifier（UFI） その他独自の識別子（過去の申請番号等）
製品の情報	製品のタイプ（消費者／職業／工業用途） 欧州製品カテゴリ化システム（EuPCS） 梱包タイプ／サイズ

（資料）Guidance on harmonised information relating to emergency health response – Annex VIII to CLP（Version 3.0）より、みずほ情報総研にて作成

ここでは、CLP 規則第45条及び緊急時の健康への対応に関する情報の調和に関する CLP 規則の付属書 VIII の施行に関する文書である「Guidance on harmonised information relating to emergency health response – Annex VIII to CLP（Version 3.0）」より、新しい規則の内容と今後の利活用の展開を簡単に紹介する。

新規則における中毒センターへの情報登録義務は2021年1月1日より消費者用途の混合物(5)及び業務用途の混合物に、そして2024年1月1日より工業用途の混合物に適用されることが見込まれている。ただし、既に市場に出回っており、かつ加盟国の中毒センターに情報が届け出られている製品については、届出情報に変更が生じない場合に限り、2025年1月1日までの移行期間が設けられている。

図表9 UFIコードの活用シナリオ



（資料）みずほ情報総研にて作成

新規則において、図表8が事業者の情報提供すべき項目であり、Poison Centre Notification（PCN）format に従って作成される必要がある。

この中で特に注目すべき新しい内容として、混合物組成又は製品特有のコードである固有の配合識別子（Unique Formula Identifier; UFI）

図表10　CLP 規則における第45条緊急健康対応のための情報の利用目的

2. 任命された各機関は、受領した情報の機密保持についてあらゆる必要な保証を提供しなければならない。このような情報は以下の目的にのみ使用することができる。
(a)特に緊急の事態において、予防措置および救済措置を策定するための医学的必要性を満たすため。
(b)加盟国の要請により、リスクマネジメントの必要な改善点を把握するため統計分析を実施するため。
この情報を他の目的に使用してはならない。

（資料）CLP 規則第45条2項をみずほ情報総研が翻訳。下線は筆者が編集している。

の届出及びラベル表示（及び工業用途の場合にはSDS）を行う必要がある点である。

ユーザーは、中毒等の事故が起きたときに、中毒センターにUFIの番号を伝えることによって、毒性情報や医療情報等必要な情報が得られるとしている。

一方、事業者にとってはSDS記載内容以上の詳細な成分情報の開示（注：ただし、濃度範囲での登録が認められている）が求められることになり、また前述のUFIのラベルへの追記等の対応など、負荷は大きいことが予想される。

また欧州化学物質庁（ECHA）は、危険有害性のある混合物の情報を記載する文書の作成と提出を支援するポータルサイトを公表しており、申請に必要な各種支援ツール（UFI作成ツール、EuPCS選定システム及びPCNのための書類一式作成のためのIUCLID 6又はIUCLID Cloud）をダウンロードできる。

4. 今後の展望

リスクアセスメント支援ツールによって、事業者は簡単に化学物質のリスクを把握し、対策等を検討できるようになったが、特に中小規模の事業所においては、「リスクアセスメント実施方法がわからない」や「専門人材不足」(6)よってリスクアセスメントが進んでいない事業場も多いと想像される。そのため国として、その実態を把握し、何らかの対策を進めていく必要がある。

第13次労働災害防止計画においては、労働現場における化学物質の取扱い等について「国がこうした事案を把握できる仕組みがないこと」から、対策の例として「化学物質による職業性疾病を疑わせる事例を把握した場合に国に報告がなされる仕組みづくり」を挙げている。

欧州においては、前述の中毒センターの届出によって、巨大な化学品データベースが作られてようとしている。当該データベースはCLP規則45条の目的にもある通り、緊急時の対応に活用されるのはもちろん、行政機関における化学物質の取扱い情報の把握・分析に用いられると考えられる。

我が国においても、欧州における化学品の届出制度は、我が国の職場における化学物質の取扱い実態把握に向けて、多いに参考になるものと考えられる。

そのため、引続き諸外国における化学物質管理の届出制度やそのデータ利活用に係る進展に注目することが望まれる。

注

(1)　安全データシート。取り扱い物質に関する情報（毒性情報、取り扱い方法、法規制情報等）が記載されている。

(2)　欧州における化学品の分類、ラベル表示、包装・梱

包に関する規則のこと

⑶ CLP規則第45条の下に欧州加盟国は有害性混合物の成分に関する情報を受理するための指名された機関のことで、中毒センター（Poison centres）と呼ばれる。

⑷ 実測の結果はサンプル数2であり、日内変動及び日間変動を考慮すると、幾何標準偏差（GSD）=2であれば、平均値に対して測定結果は最大3倍程度の幅を持つと考えられるが、推計値はいずれも殆どその範囲に収まっていることから、評価結果は「近い値が得られた」と判断した。なお、ECETOCの結果がやや過小に推計されている理由として、当該PROCでは少量（mL単位）の取り扱いが想定されているため、L単位を取り扱う今回の作業に対してばく露がやや過小になっていると考えられる。

⑸ 当初は2020年1月1日からの適用を予定していたが延期された。

⑹ 労働安全衛生調査（平成29年）によると、義務対象物質全てについてリスクアセスメントを実施している事業場の割合は53％（従業員50人未満の企業では実施率は4割以下）であり、未実施の理由は「十分な知識を持った人材がいない」55％、「実施方法が分からない」35％などが挙げられている。

参考文献

1. 化学物質等による危険性又は有害性等の調査等に関する指針（平成27年9月18日付け公示第3号）
2. CREATE-SIMPLE—職場のあんぜんサイト—厚生労働省
   https://anzeninfo.mhlw.go.jp/user/anzen/kag/ankgc07_3.htm
3. Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment, Chapter R.14: Occupational exposure assessment, Version 3.0 August 2016
   https://echa.europa.eu/documents/10162/13632/information_requirements_r14_en.pdf
4. 村井政志、馬場左起子「実験室等の有害物少量取扱い作業場におけるばく露評価のための各種気中濃度測定方法の活用—自律的管理のためのばく露濃度の推定—」労働安全衛生研究、Vol. 3, No.2, pp.129-136（2010年）
5. Guidance on harmonised information relating to emergency health response – Annex VIII to CLP（Version 3.0）
   https://echa.europa.eu/guidance-documents/guidance-on-clp
6. 厚生労働省「第13次労働災害防止計画（2018年度～2022年度）」
7. Regulation（EC）No 1272/2008 on the classification, labelling and packaging of substances and mixtures（CLP Regulation）

社会動向レポート

認知症高齢者の経済活動への対策と任意後見の活用について

社会政策コンサルティング部
チーフコンサルタント　高橋　正樹

超高齢化社会を見据え、避けて通れない重要課題の一つに認知症対策が挙げられる。高齢社会白書（内閣府）によると、団塊世代が75歳以上となる2025年には、認知症患者数は700万人前後に達し65歳以上の高齢者の約5人に1人を占めることが推計されており、認知症は誰しもがかかわりのある身近な病気となっている。しかしながら、認知症の人が日常生活を送る上でぶつかる課題・障壁は個人による違いも大きく、また一般的に認知症に対するネガティブな印象が先行している傾向もある。そのため社会全体として認知症の人の自己決定の機会を守り、本人の希望に応じた経済活動等を続けていくことができるようにするための対策も必ずしも十分でないと考えられる。これまでの成年後見制度に関する調査研究より、自らが望む生活の実現にむけた任意後見制度の活用による認知症への対策について紹介する。

1. はじめに

認知症への対策は、医療機関にかかり介護に向けたケアプランを作れば十分だと思っている方もいるのではないだろうか。確かに認知症を病気という観点から捉えれば、医療機関にかかること、身体的な機能低下については介護サービス等により支援を行うことが、それぞれ適切であることには間違いはない。しかしながら、認知症の最大の課題は、認知機能の低下にあり、判断能力が衰えていくという“脳”の病気ということである。

このような判断能力低下の影響は、財産管理能力の低下、契約効力の無効、口座や資産の凍結等も発生する可能性があり、日常生活および経済活動への影響は甚大となる。また、消費者白書（消費者庁）では、認知症高齢者は、販売業者による勧誘や販売契約を結ぶ場面で、一般の高齢者より詐欺等のトラブルに遭いやすい状況にあると指摘されている。このため脳機能が低下していくことへの対策は、介護等の身体的な対策のみで十分とは言いがたい。

成年後見制度は、このような認知症高齢者をはじめとした判断能力が低下した方の権利擁護を目的とした法制度であり、本人の身上保護及び財産管理を支援する機能を有している。この法制度は、2000年4月に「介護保険制度」のスタートと同時に進められてきた制度であるものの十分に利用されていないのが現状である。本レポートでは、本人及び家族が今後の人生をより充実させたものとするための対策として、これまでの成年後見制度に関する調査研究の結果より成年後見制度（主に任意後見制度）の活用について紹介する。

2. 成年後見制度とはどのような制度なのか

(1)成年後見制度のしくみ

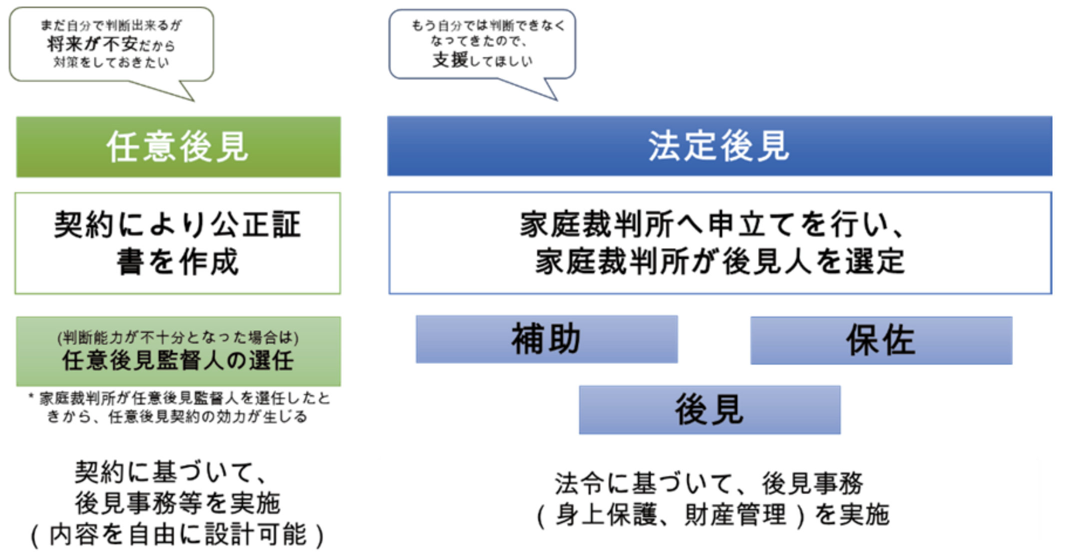
成年後見制度は、認知症、知的障害、精神障害などにより、判断能力が十分でない人の権利を擁護するために“後見人”という本人の意思決定の支援や、契約などの法律行為を代行する人を選任する制度である。成年後見人の役割は、本人の意思を尊重し、かつ本人の心身の状態や生活状況に配慮しながら、必要な代理行為を行うとともに本人の財産を適正に管理していくこととされている。

このような支援を行う後見人を選任する成年後見制度は、大きく法定後見と任意後見の2つに分かれている。法定後見は、既に判断能力が低下した場合に申立により家庭裁判所によって選任された後見人等が、本人に代わって財産や権利を守り本人を法的に支援する制度である。本人の判断能力の状態に応じて、補助、保佐、後見の3つの類型が設定されている。

一方で任意後見は、将来において判断能力が不十分となった時に備えるため、後見人を本人が選び、公正証書で任意後見契約を結ぶ制度である。法定後見に比べ、本人が人生計画について自由に設計することが可能となっている。

現状、日本では法廷後見である後見類型が最も多く利用されていることを鑑みると、本人の判断能力がほとんど無くなってしまい、法的効力を持つ後見人が、どうしても必要な状態となって初めて成年後見制度利用が選択されているケースが相当数含まれてしまっているものと推察される。このため、一部では対策が後手に回ってしまい、早期の対策・支援が出来ず、結果的に本人の望む生活から逸れてしまうことが懸念される。一方で、任意後見は事前に計画しておくという面において、法廷後見とはその性質を全く異にしており、自らの望む生活の実現にむけて成り行きに任せるのではなく、早期から必要な支援を確保し、対策を講ずることができる点が大きなメリットと言える。

図表1　法定後見と任意後見



（資料）みずほ情報総研作成

(2)任意後見制度の利用状況

法務省統計「成年後見登記の件数」で任意後見制度の利用状況を見ると令和元年は、1万4千人近くの利用者が任意後見契約を締結しており、この5年間で約4割増となっている。認知症高齢者の増加に伴い少しづつ任意後見について注目されてきているものと考えられる。

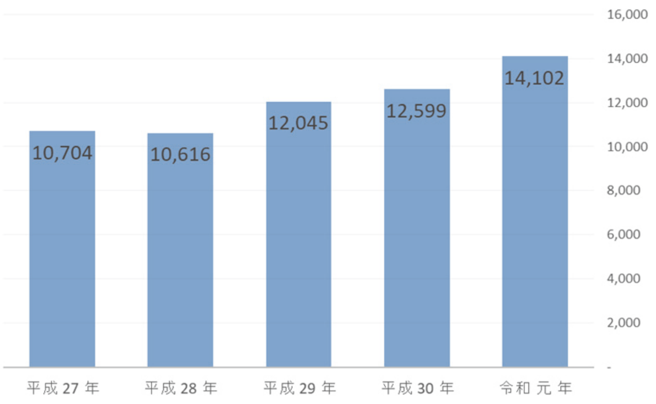
(3)任意後見の利用実態(アンケート調査結果)

弊社では平成30年度、厚生労働省老人保健健康増進等事業「認知症の人の成年後見制度の利用における保佐・補助の活用及び成年後見人の確保に関する調査研究事業」において、全国の成年後見実施機関及び成年後見人を対象とした任意後見についてのアンケート調査を実施した(回答数:法人 249件 個人 318件)。ここではその調査結果の中から、いくつか特徴的な項目について紹介する。

① 任意後見制度を利用するきっかけ・動機等

任意後見を検討するきっかけは、「身寄りがない又は頼れる親族がおらず、将来の介護施設入所や介護サービスの利用、死後事務等に不安を感じたため」が7割以上を占めている。また、任意後見契約締結の動機については、「預貯金等の管理・解約」が最も多く、そのほかでは「身体

図表2 任意後見契約の締結数



(資料)法務省統計「成年後見登記の件数」よりみずほ情報総研作成

図表3 任意後見を検討するきっかけ〔複数回答〕

No.	回答が多かった項目	法人・団体		個人	
		回答数	割合	回答数	割合
1	身寄りがない又は頼れる親族がおらず、将来の介護施設入所や介護サービスの利用、死後事務等に関して不安を感じたため	54	72.0%	60	71.4%
2	金銭管理や契約行為が困難となってきたため	6	8.0%	5	6.0%
3	成年後見制度に関するセミナーや研修等を受講したため	4	5.3%	5	6.0%
4	後見人となる人を指定したかったため	3	4.0%	4	4.8%
5	地域包括支援センターや行政から紹介されたため	1	1.3%	8	9.5%
	全体	75	100%	84	100%

(資料)みずほ情報総研「厚生労働省平成30年度老人保健健康増進等事業
認知症の人の成年後見制度の利用における保佐・補助の活用及び成年後見人の確保に関する調査研究事業」

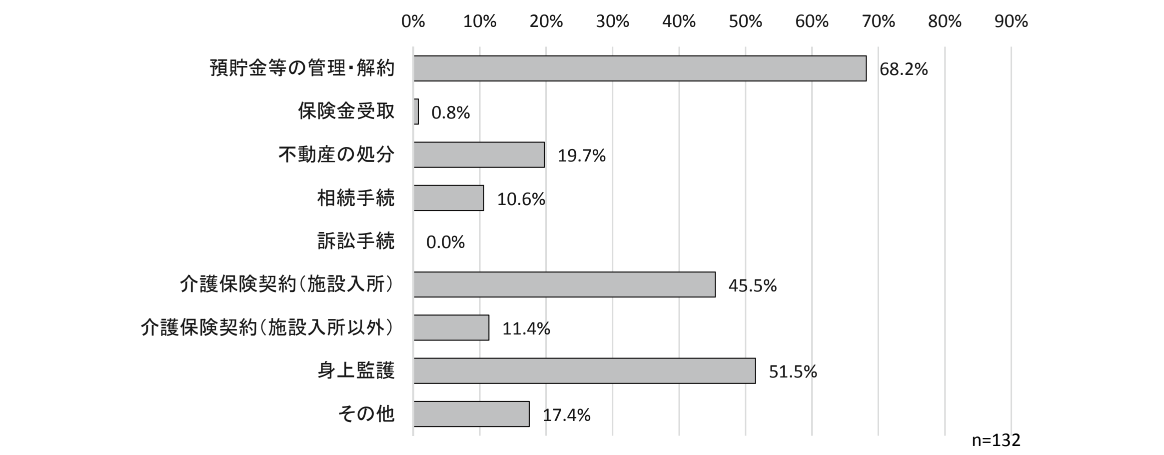
監護」「介護保険契約（施設入所）」が多く挙げられている。

② 任意後見契約を利用するメリット

任意後見契約のメリットとしては、「本人が後見人を指定でき、契約内容も本人の希望に沿って決めることができること」及び「本人が元気な段階から関わることができるので、本人の意思を充分に反映した形で後見活動ができること」の2点が多く挙げられた。また、「財産管理委任契約や死後事務委任契約などの契約を同時に締結することで本人が元気な段階から亡くなった後まで一貫した支援をおこなうことができる点」が挙げられた。

また、上記調査研究では、有識者による検討委員会（座長：新井誠 中央大学教授）も実施しており、この委員会にてまとめられた任意後見のメリットは、図表6のように自身の意思を充分に反映させた計画（契約内容）に基づいて、必要な支援（法的保護・意思決定支援）を受けることが可能となる点などが挙げられた。

図表4 任意後見契約を締結する動機〔複数回答〕



（資料）みずほ情報総研「厚生労働省平成30年度老人保健健康増進等事業
認知症の人の成年後見制度の利用における保佐・補助の活用及び成年後見人の確保に関する調査研究事業」

図表5 任意後見契約を利用するメリット〔自由回答〕

No.	回答が多かった項目	法人・団体		個人	
		回答数	割合	回答数	割合
1	本人が信頼する人物を任意後見人として指名でき、任意後見人への依頼内容も本人の希望に沿って決めることができる点	44	57.1%	35	50.7%
2	（特に移行型の任意後見契約では）本人が元気な段階からサポートを開始するため、本人のパーソナリティや嗜好を重視して後見人活動を行うことができる点	34	44.2%	21	30.4%
3	財産管理委任契約や死後事務委任契約、遺言の利用により、認知症が発症する前から亡くなった後まで一貫して対策ができる点	16	20.8%	16	23.2%
4	本人の楽しみや意思を重視した（積極的な）財産管理が可能な点	4	5.2%	6	8.7%
	全体	17	100%	69	100%

（資料）みずほ情報総研「厚生労働省平成30年度老人保健健康増進等事業
認知症の人の成年後見制度の利用における保佐・補助の活用及び成年後見人の確保に関する調査研究事業」

図表6　検討委員会にて取りまとめられた任意後見のメリット

★任意後見を利用するメリット★

- 本人が望む生活の実現を目的として、自身の意思を充分に反映させた計画（契約内容）に基づいて、必要な支援（法的保護・意思決定支援）を受けることが可能となること。
- 本人が後見人を指定できる（法定後見の場合は裁判所が指定）ため、自らの支援を安心して任せられる人を選定した上で、必要な支援を受けることができる。
- 認知症が発症する前から支援を受けることが可能なため、生活環境及び日常生活上の機能の長期的な維持が期待できるとともに、認知症状が現れた後でも、本人の残存能力を活かした対策を実施することができるため、本人にとっての選択肢を大きく広げることが可能であること。

（資料）みずほ情報総研「厚生労働省平成30年度老人保健健康増進等事業
認知症の人の成年後見制度の利用における保佐・補助の活用及び成年後見人の確保に関する調査研究事業」

3. 任意後見制度を用いた認知症への対策

(1)好事例紹介（品川成年後見センター）

上記調査研究において好事例として取り上げた品川成年後見センターについて紹介する。品川成年後見センターは、品川区社会福祉協議会が運営する、高齢者や障害者の方々が地域で安心して生活できるよう、「成年後見制度」の情報提供・相談・申立手続きの支援をしているセンターである。

品川成年後見センターでは、任意後見制度を含めた総合的サービスを提供しており、任意後見契約に加えて、サポート契約や死後事務委任契約などの契約を同時に締結することで、本人が元気な段階から亡くなった後まで一貫した支援をおこなっている。このような社会福祉協議会による一貫したサービスは、認知症対策として非常に長期的かつ広範囲なサポートであり、認知症高齢者にとって心強いサービスとなっている。

(2)さらなる経済活動への対策（任意後見と信託の活用）

近年、任意後見の発展型として任意後見と信託との併用が注目されている。これまでも成年後見には後見制度支援信託があり、これは日常的な（小口）資金と、日常的ではない（大口）資金を区別して、詐欺などの被害防止、本人及び支援者、関係者による資金の使い込み防止などの効果がある信託制度である。また、このような制度に類似した後見制度支援預金もサービスとして開始されているところである。

発展型としての任意後見と信託の活用においては、上記のような資産の保全目的のみならず、相続や事業承継、持ち家等の不動産売却など、認知症高齢者が抱える経済活動の課題解決の有用な選択肢として期待される。

理由としては、任意後見は、本人が自由に設計できる上に任意後見監督人による管理体制があり、安全性が高いというメリットがある。加えて、信託による財産管理では受益者と受託者を分けることができるため資産に対するコントロール力を集中させながら経済的なメリットを分散できるなど、財産管理のスキームが組みや

図表7　任意後見契約の活用の好事例

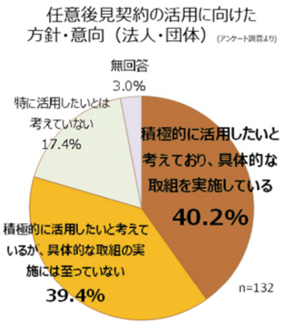
事例①本人が望む生活の実現に向けた取組（任意後見契約の活用:品川成年後見センター）

任意後見契約を活用した高齢者への安心サポート

■　**成年後見制度を本人が積極的に活用するための高齢者支援サービスに関する取組**

ポイント

- **単身高齢者及び高齢者夫婦が元気なうちから、自身の判断能力が将来低下した場合に備えて利用できるサービスとして、「あんしんの３点セット」**を品川成年後見センターが提供している。
- アンケート調査結果においても、**自らの望みに沿った支援を依頼できることや、本人が後見人を選定できるというメリット**のある**任意後見を積極的に活用したい**と考えている法人・団体は、**80%**近くと非常に多い。（高齢者の権利擁護関連事業を実施している法人・団体への調査）



背景・取組概要

- **品川成年後見センターでは、「あんしんの3点セット」として、あんしんサービス契約、任意後見契約、公正証書遺言作成支援の一貫したサービスを提供**している。
  - ✓ あんしんサービス契約は、月一回の訪問により健康状態等を確認・把握している。
  - ✓ 任意後見契約は、医療や介護など本人がどのようにしたいのか方針を決めておき、必要な時にあらかじめ決めた手続きを進めることができる。
  - ✓ 公正証書遺言で葬儀やお墓などの方針についても決めておくことができる。
- 任意後見監督人選任の申立てを適切なタイミングで行えるよう、定期的な訪問で本人の状態を把握するとともに、本人に関わる医療・介護の関係者と密に連携をとっている。

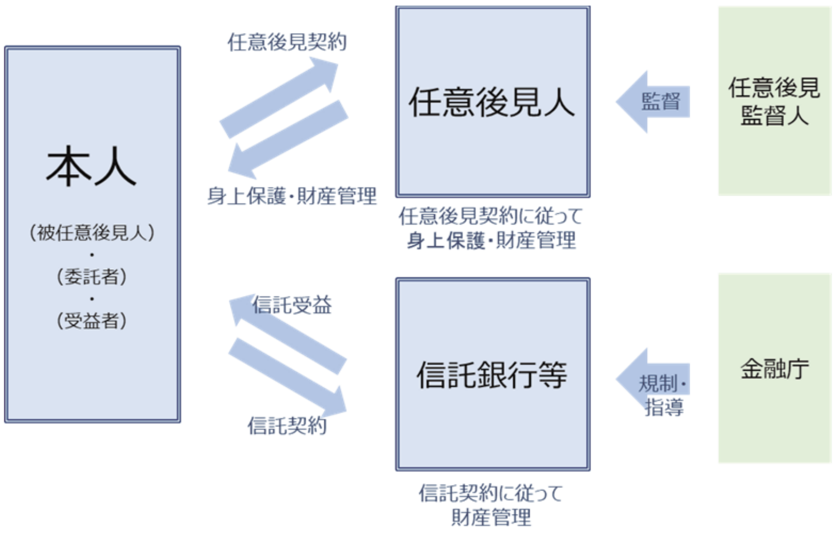
期待される効果や今後の展開等

- 任意後見制度の特徴（メリット）は、本人が後見人を指定し、契約内容まで決めることが可能な点である。現在、法定後見よりも利用者数が少ない状況となっているが、自己決定尊重の観点から考えると、任意後見制度の普及拡大・更なる活用が期待される。
- また、任意後見制度の更なる活用に向けては、本人の判断能力が低下した際に任意後見監督人の選任申立てがスムーズかつ適切に行われることが必要と考えられるため、「本人がどのような状態になったら任意後見監督人の選任申立てをおこなえばよいのか」の基準を示した参考資料等の整備が期待される。

<参考資料>品川成年後見センターHP「マンガで読む成年後見制度」

（資料）みずほ情報総研「厚生労働省平成30年度老人保健健康増進等事業
認知症の人の成年後見制度の利用における保佐・補助の活用及び成年後見人の確保に関する調査研究事業」

図表8　任意後見と信託の活用スキーム例



（資料）みずほ情報総研作成

すい点がメリットである。特に相続や事業承継など複数利害関係者の調整に効果を発揮できるものと考えられる。信託銀行などが扱う商事信託では、財産を強固に保全できる点や高齢者向けの医療介護費等の支払代行サービスなどが利用できることが、支援のサポートになると思われる。今後、このような高齢者向け金融サービスの発展と共に、任意後見の活用がさらに促進されることが期待される。

4. おわりに

地域共生社会の時代を迎え、認知症に対する社会の支援力は着実に強化されてきている。一方で、日常生活の世話や身体的な介護以外での経済活動に対する認知症への対策は、発展途上となっている部分も多いと考えられる。任意後見制度は、認知症により判断能力が不十分となってしまうことに備えて本人が望む生活の実現を支援する制度である。本人の意思を尊重しながら本人の生活を法的に保護できる仕組みとなっている。利用者が増加しているところであるが、更なる活用及び利用促進が期待されるところである。

また、成年後見制度利用促進に向けた体制整備として、地域の権利擁護支援および成年後見制度利用促進機能の強化を進める中核機関の設置が全国にて進められている。今後、地域における権利擁護支援のネットワークが広がっていくことが計画されており、権利擁護の支援を受けやすい環境が広がっていくことが期待される。

認知症への対策では、本人がどのような状況であるのかを見定め、今後の人生計画について本人及び支援者が共に検討し、一つ一つ具体的に行動につなげていくことが大切である。長期的な視点をもって認知症の進行によって訪れる判断能力の低下と身体機能の低下の両面に備えるべく、本人にとって充実した人生を歩む方法について支援者・関係者の方々と話し合うことが何よりも重要と考えられる。本レポートにおける調査結果及び事例が一助になれば幸いである。

技術動向レポート

都市の動きを丸ごと予測できるか？ データとシミュレーションの活用

サイエンスソリューション部
課長 小坂部 和也

1. はじめに

本稿の執筆はCOVID-19の緊急事態宣言解除後の2020年6月に行ったが、毎日の感染者数だけではなく、主要駅周辺の人出が、感染拡大前や緊急事態宣言前と比較して、どの程度増えた、あるいは減ったという報道を見ることが増えた。このような報道で示された元のデータは主に通信会社が保有するものであり、利用者の通信と位置情報を紐づけて、個人の特定がされないよう、統計分析されている。現在はカーナビだけでなく、徒歩や自転車の移動にも、スマートフォンの地図アプリを使う人が増えている。多くの人が、地図アプリ、あるいは位置情報を使って、便利さを享受する機会が増えたと言えよう。これは、多くのデータが通信会社に蓄積されるとともに、異なるデータが相互に関連づけられていることの裏返しでもある。では、2020年12月の主要駅周辺の人出を予想できるか。これは非常に難しい問いである。そもそも国内、海外ともに感染者の今後の増減が予想しにくい上に、その時、あるいは直前の気候の状態、景況、政治判断、渡航者の制限の有無、そして程度や、例えばリモートワークの浸透度合い等、様々な要因が複雑に関連する。この関連が定性的、定量的に説明できるようなモデルができれば、将来的に予測ができるかもしれない。

多くのデータを用いて予測を行う代表的なものは、天気予報であろう。各地で観測された過去のものも含めた大量のデータに加えて、物理モデルも併せて予測が行われる。様々な理論式を基に、天気に関する現象を把握するための物理モデルが考案され、その物理モデルとデータを組み合わせることで、予測の精度の向上が図られている。当然だが、日本各地の天気を予測する際に、同じ土地や天気の状態をそのまま作ることはできない。そのため、コンピュータの中で仮想的に土地や天気の状態を設定するとともに、様々な物理モデルを組込むことで、未来の状態、天気を予測している。気象分野ではこれまで長きに渡って研究開発や検証が行われ、予測に関わる主要な物理現象の要素が定性的、定量的に関連づけられ、結果として物理モデルとして構築、更新されるとともに、大量のデータと組み合わせて予測に用いられているのである。本稿では、物理モデルを使ってコンピュータの中で行う科学の実験を、物理シミュレーションと呼ぶ。ここでは物理シミュレーションの適用例として気象を挙げたが、自動車、航空、船舶、電機、産業機械、建設、エネルギー、製薬等、非常に多くの分野で、製品、設計、生産等の用途に物理シミュレーションが活用されている。

本稿では、国土交通省による「データ」に関連する最近の取り組みと、そのデータと「物理シミュレーション」を組み合わせてインフラや都市の設計や維持管理の高度化を目指す一例に

ついて紹介したい。

2. データを活用した国土交通分野のデジタルツインの実現に向けて ―国土交通データプラットフォーム―

冒頭で、位置情報について簡単に触れたが、多くの位置情報を保有している国土交通省による「データ」に関連する最近の取り組みについてまず紹介する。いわゆる公共工事と聞くと、大きな実際の建造物、例えばダムや道路、橋などを思い浮かべて、デジタルとは離れた印象を持つ人も多いだろうが、近年デジタル化に大きく舵を切っている。その代表的な取り組みの一つが、国土交通データプラットフォームである。国土交通省においては、位置情報を含めた多種多様なデータを連携して、施策の高度化や産学官連携によるイノベーションの創出を目指す試みとして、国土交通データプラットフォームの整備計画を2019年5月に策定し、プラットフォームの構築を進めてきた(1)。

この計画では、国土交通省が多く保有するデータと民間等のデータを連携し、フィジカル(現実)空間の事象をサイバー空間に再現するデジタルツインにより、業務の効率化やスマートシティ等の国土交通省の施策の高度化、産学官連携によるイノベーションの創出を目指すことを目的としている。国土交通データプラットフォームの将来の機能として、以下の3つが挙げられている。

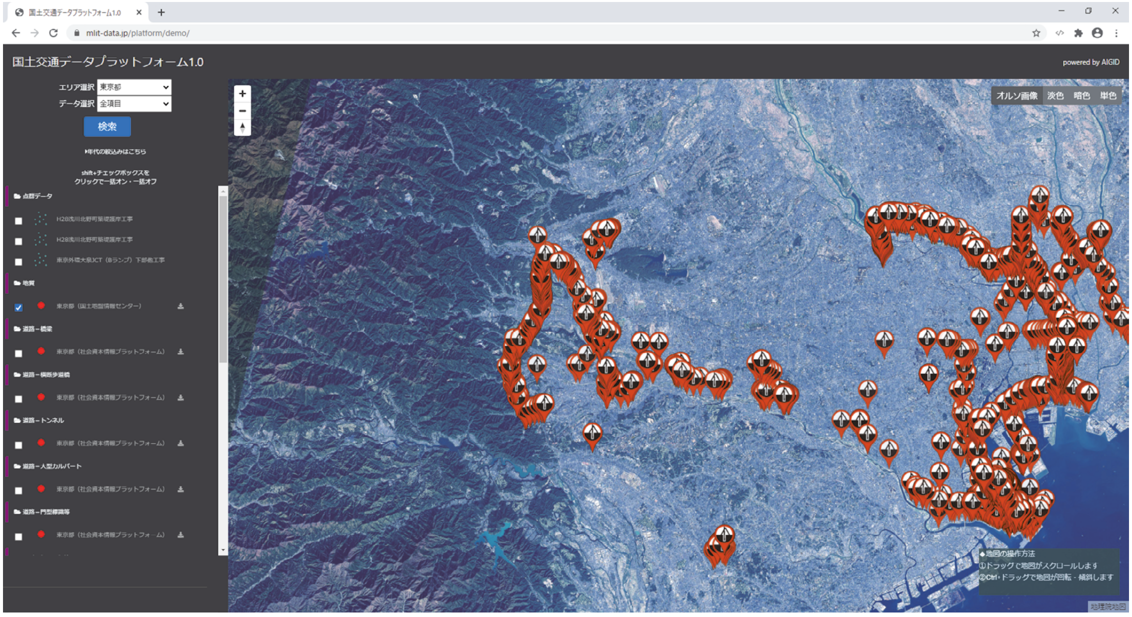
・*3次元データ視覚化機能*
　国土地理院の3次元地形データをベースに、3次元地図上に点群データ等の構造物の3次元データや地盤の情報を表示する。
・*データハブ機能*
　国土交通分野の多種多様な産学官のデータをAPI (Application Programming Interface)(2)で連携し、同一インターフェースで横断的に検索、ダウンロード可能にする。
・*情報発信機能*
　国土交通データプラットフォームのデータを活用してシミュレーション等を行った事例をケーススタディとして登録・閲覧可能にする。

国土交通省資料(1)より引用

国土交通データプラットフォームで扱うデータは、地図・地形、気象、交通(人流)、施設・構造物、エネルギー、防災等多岐に渡り、活用が想定される分野としては、MR技術、自動運転、防災シミュレーション、観光・レジャー、バリアフリー、維持管理、スマートシティ等で挙げられる。国土交通データプラットフォームは、その中で全てのデータを保有するのではなく、各種のデータベースをAPIで連携、ダウンロードできるような仕組みが検討されている。

2020年4月には「国土交通データプラットフォーム1.0」が一般公開された(3)(4)。Webブラウザにより誰でも無料でアクセスすることができる。画面の例を図表1に示す。画面右側に地図が表示され、画面左側でどのデータを地図と併せて表示させるかをユーザーが選択できる。図表2の例は点群データを3次元的に可視化したものである。このように、データをWebブラウザ上で地図情報と併せて可視化するだけでなく、ダウンロード等の操作を行うことができる。現在利用できるデータは、国や地方自治体が保有する橋梁やトンネル等の社会インフラ施設の諸元データや、全国のボーリングデータ等計22万件である。このように、国土交通省が保有するデータ、具体的には位置情報とデータの内容を組み合わせて地図上に可視化することで、利用者にわかりやすく見せるだけでなく、その後にダウンロードなど、利用できるよう整備が進められている。

図表1　国土交通データプラットフォーム v1.0の画面の例　東京都の地質データ



（資料）国土交通データプラットフォーム v1.0 をもとにみずほ情報総研作成

図表2　国土交通データプラットフォーム v1.0の画面の例　点群データの三次元表示

（資料）国土交通データプラットフォーム v1.0 をもとにみずほ情報総研作成

国土交通省は、まず今年度末には国土に関するデータを連携したプラットフォームの構築を目指し、2022年度末には国土、経済、自然現象等に関するデータを連携した統合的なプラットフォームの構築を目指している。さらに、次のような出口戦略を掲げている。

- *i-Construction*[(5)]*によるスマートインフラ管理を加速するため、地形・地盤情報、インフラ台帳(2次元・紙)等を使って、インフラ全体の3次元モデルを作成するためのデータ連携の技術を開発*
- *共通中間データ(Common-Modeling-Data)を介して様々なデータを統合的に活用し、ニーズに合致したモデルを構築*
- *次世代スパコンによる解析やAIの活用により、自動施工、地震倒壊解析、老朽化予測アセットマネジメント等に活用(オープンイノベーション)*

国土交通省資料[(4)]より引用

単に地図上でデータを可視化して、ダウンロードするだけではなく、そのデータを活用することが今後のターゲットとされていることがわかる。また、「様々なデータの連携」、「インフラ全体の3次元モデルの作成」、「ニーズに合致したモデルの構築」の技術を確立して、物理シミュレーション等に繋げることが重要であると言える。

この国土交通データプラットフォームの取り組みについて着目したい点が2点ある。まず、現状では国土交通データプラットフォームを通じて、「データ」の提供を行う準備の段階であるが、将来的にはデータの利用に留まらずに地震シミュレーションのような「物理シミュレーション」との組み合わせを視野に入れて、インフラや都市の設計、施工、維持管理の高度化を目指している点である。もう1点は、日本全国、あるいはある都市丸ごとに対して一括でデータ整備を行おうとしている点である。冒頭で述べたように、大量のデータが整備され、物理モデルの構築や検証が進められれば、天気予報のように、将来の予測への活用が可能な分野も出てくるだろう。

3. シミュレーションにおけるデジタルデータの活用

(1)シミュレーションの発展の歴史

①　シミュレーションの萌芽期―原子力・航空―

前節では国土交通データプラットフォームの概要を紹介するとともに、国土交通データプラットフォームを活用した効率的、効果的な物理シミュレーションが今後のスコープに含まれていることを述べたが、本節では物理シミュレーションについてその歴史や用途、データとの関係について簡単に紹介したい。

物理シミュレーションはすでに建設業において主に設計業務にはなくてはならないものになっている。その歴史を振り返ると、原子力や航空分野を中心に技術開発が行われてきた。安全上重要な構造物を設計しようとする際に、本来は本番と同等のものを事前に準備して、安全上留意すべき点を洗い出した上でその知見を本番の設計に反映させたい。しかし、当然だが原子力発電所を実際に運転させるものと別に同等のもの建設したり、実物大の航空機を落下させたりすることは現実的ではない。そのため、物理シミュレーションを行い、相応の余裕を見込んで設計を行う必要がある。このような経緯から、原子力、航空分野での物理シミュレーションの活用が進んだ。

②　シミュレーションの発展と活用―自動車―

以降、特に自動車に代表される製造業において物理シミュレーションの利用が拡大した。そ

の理由は2つ挙げられる。まず、原子力発電所や航空機ほど大きくなく、複雑なものでなければ、量産前に試作品を作って試験を行い、物理シミュレーションとの比較ができる点である。加えて、元々物理シミュレーションはコンピュータを使って行われてきたが、設計が紙の図面からコンピュータのソフトに置き換わり、形状や寸法のデータをコンピュータ上でそのまま物理シミュレーションへ取り込みやすくなった。

製品の大きさに着目すると、実物大のものを作って例えば破壊させるような試験ができるぎりぎりの大きさの製品が車だと言われている。しかし、量産の前に多くの数の車を試作して、それらの衝突試験を繰り返しても、コストが高くなるばかりである。そのため、物理シミュレーションの結果と数少ない実験で得られた計測結果の比較を通じて、物理シミュレーションの適用性、妥当性を確認し、その後はシミュレーションのみで様々な評価を行うプロセスが取られている。車のテレビコマーシャルでは、少し前は衝突安全、燃費性能をアピールするものが多かった。最近のものではCASE[(6)]をアピールするものが多いが、衝突安全、燃費性能は完成車メーカーの設計において永遠の課題と言えるだろう。硬くて重い車にすれば、一般的に衝突時に壊れにくいが、一方で燃費が悪くなる。逆に、軽い車にすれば燃費性能はよくなるが、衝突時の安全は保ちにくい。実は、車のある一部を相対的に変形しやすくすると、衝突時の運転席の衝撃が比較的小さくできる。ではどのような材料、形状の組み合わせにすれば、軽くて安全な車になるか、実験と膨大な数の物理シミュレーションを活用した取り組みが、日々行われている。

(2)製造業におけるデジタルデータの活用と建設業との比較

① デジタルデータと物理シミュレーション

冒頭のデータの話から物理シミュレーションの話に移ったが、ここで両者の関係を述べたいと思う。物理シミュレーションを行うには、様々なデータが必要である。例えば製造業における物理シミュレーションの場合、対象がどのような形をしているか、どの程度の大きさか(形状、寸法のデータ)、硬いのか柔らかいのか、熱を通しやすいのか通しにくいのか(材料特性のデータ)、1つのものなのか、複数のものが組み合わさっているか(アセンブリのデータ)、複数のものが組み合わさっている場合は接しているのか、離れているのか(相互作用のデータ)、対象のものが止まっているのか、動いているのか(境界条件のデータ)、どのような状態を想定するか(時刻歴のデータ)等が挙げられる。また、同じような物理シミュレーションを行う場合でも、使用するソフトウェアが異なれば、同じデータを入力しようとしても、その設定方法が異なる。

自動車、航空、船舶、電機、産業機械、建設、エネルギー、製薬等の分野において、流体、構造、伝熱、電磁気、化学、分子等の様々な物理シミュレーションが行われているが、どのような物理シミュレーションでも必要となるデータはほぼ似たようなもので、物理シミュレーションの技術開発が始まった当初から変わらない。しかし、近年はコンピュータの性能が向上したことや、複雑な物理現象を解くことができるソフトウェアが増えたことにより、大規模なシミュレーション、すなわち広い領域を対象としたものや、細かい領域を高い解像度で評価する要求が高まっている。さらに、たくさんのシミュレーションを短時間で行って、様々な因子の影響を分析することも増えており、物理シミュレーションの入力データを多数作成する→実行する→結

果データの分析をする、という一連の流れを、速やかに繰り返し行う必要がある。

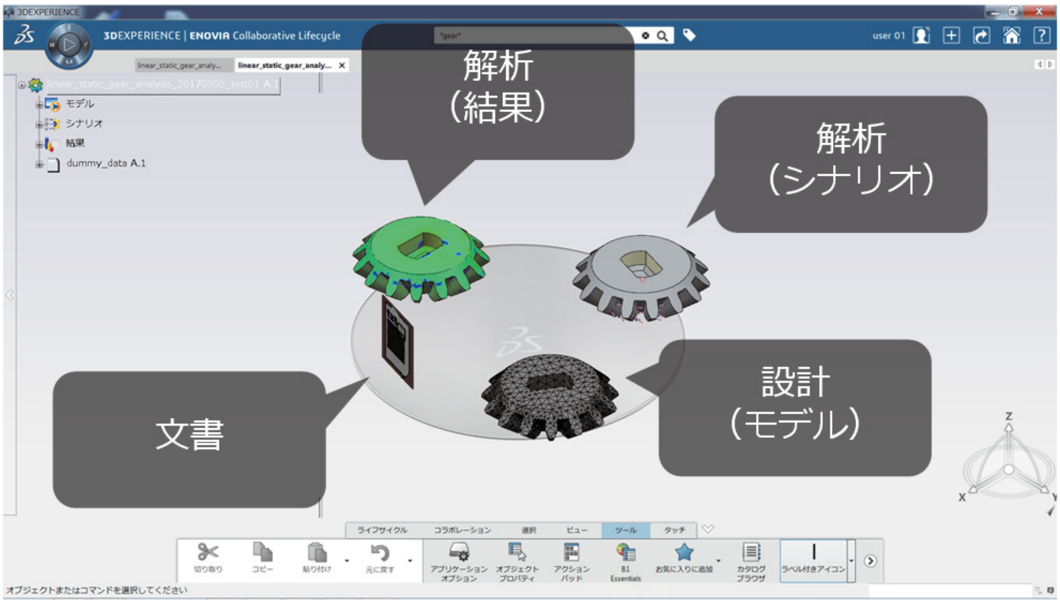
② データのシームレスな利用
—プラットフォームの発展—

これまで、設計にはその専用のソフト、同様に物理シミュレーションにはその専用のソフトが個別に使われてきた。また、多くの会社では設計と物理シミュレーションを行う部署は別々、またそれぞれ専門性が必要なため担当者も別々であることが多かった。しかし、全体の作業効率が向上しない等の課題が発生したため、例えば設計のソフトに、設計者も使える簡単な物理シミュレーション機能が実装されたり、物理シミュレーションのソフトに、様々な形式の形状ファイルを読み込める機能が実装されたりしてきた。しかし、このような方法でも効果は限定的であり、近年は設計、物理シミュレーションだけでなく、部品表等のデータを一括管理して、同一のプラットフォーム上で扱うという流れが出てきている。例えば、画面の例を図表3に示す、ダッソー・システムズによる製品ライフサイクル管理のためのプラットフォーム3DEXPERIENCE(7)が代表的なものである。設計者が扱うCADデータ、物理シミュレーションに関するデータ、またその他の文書のデータ等を紐づけて管理できるため、様々な役割の人が、それぞれの用途に応じて、作業過程に間違いが出ないように、容易にデータを利用することができる。世界的に、特に製造業においてこのようなプラットフォームの導入が進んでいる。

③ 製造業と建設業の比較

これらの動きは製造業だけではなく、建設業も同様であるが、データの扱い方はやや異なると言える。簡単に対比したものを図表4に示す。製造業では特に、自社での設計に関するデータは競合他社との差別化を図る上でも重要であり、厳重に管理されている。また、新しい製品の製造では、生産技術の観点からも、これまでの主

図表3　3DEXPERIENCE の画面の例



（資料）みずほ情報総研作成

図表4　製造業・建設業における設計時のデータ活用の違い

	製造業	建設業
データの所在	自社内で管理されているデータを主に使う。	自社だけではなく、国・自治体が保有している多数のデータも適宜使う。
設計対象	過去の製品と類似したものか、発展させたものが多い。	過去と類似したものがあるが、異なることが多い。
ソフト・プラットフォームへの要求	自社内でデータを保存して、繰り返し使えるようにする。	用途に応じて、国・自治体へのデータを検索、取得して、統合して利用する。

（資料）みずほ情報総研作成

力製品から全く異なる製品は製造しにくい。そのため、主力製品を効率よく新しい製品へ適用することが求められる。このような背景から、既存のデータを効率よく変換して、それを試行することが必要となり、それに応じたデータ管理とプラットフォームの活用が必須である。一方、建設業では、国や自治体が多くのデータを保有しており、民間会社はそれらを参照する。また、製造業よりも都度現場に応じたものを設計することになる。そのため、設計対象に応じて、適切なデータを外部から入手して、自ら使うソフトで使えるようにプラットフォーム上でデータを変換、統合する必要がある。加えて、その後の物理シミュレーションを考えると、製造業と建設業では対象、現象、スケール等が異なる。データ、プラットフォームをさらに活用していくという全体の流れは製造業と建設業で同じであるが、使われるソフトやユーザーの作業レベルで言えば発展の方向性は異なると言えるだろう。

4. 都市の動きを丸ごと予測するために

(1)都市丸ごとを対象とした既往の研究開発の例

①　国内の事例

製造業における物理シミュレーションの歴史を簡単に紹介するとともに、国土交通省による最近の取り組み、製造業と建設業のデータ活用の特徴等を述べた。また、国土交通データプラットフォームを通じたデータの活用と地震シミュレーションに代表される物理シミュレーションの組み合わせた活用が期待されていることは先に述べた通りであるが、まず国内での都市丸ごとを対象とした既往の研究開発事例について紹介したい。

建設業の構造物の設計において、考慮すべき外的要因の代表的なものが地震であり、地震を対象とするシミュレーションは古くから研究が行われてきている。地震の発生を起点とした構造物の揺れに着目すると、まず地震の発生から地殻への揺れの伝搬、地表面付近での揺れの増幅、構造物そのものの揺れに大きく分けられる。この一連の過程により構造物の地震災害の評価が可能であるが、各過程を対象としたシミュレーション技術は様々開発されており、一部は構造

物の設計にも活用されている。一方で、これらの各過程を繋ぐツールとして、堀ら(8)は各過程をシミュレーションするモジュールの機能、モジュール間を繋げるカーネルの機能、シミュレーション用に形状データやボーリングデータを変換する機能等を整備して、統合地震シミュレータ IES（Integrated Earthquake Simulator）として各機能を統合した。解析対象領域を8.0km×7.5km、253,405棟の構造物、つまり都市丸ごとを対象に、KiK-net (9)にて工学的基盤層で観測された波形100波を使って、富岳の前身のスーパーコンピュータである京で構造物の揺れに関するシミュレーションを行った。シミュレーションに要した時間は4,088秒であり、設計や評価に利用するという観点では十分に短い時間と言える。この重要な成果は、地盤のデータ、構造物のデータ、地震波形のデータ等、異種、多数のデータを扱うとともに、都市丸ごとを対象とした大規模な物理シミュレーションを短時間で行えた点である。一方で、課題を挙げるとすると、当時は誰でもこのようなデータを作って、シミュレーションを行えるわけではなかった。また、これは地震の発生から構造物の揺れに着目した大規模な物理シミュレーションの事例であるが、地形や建物に関する様々なデータを同様に扱うという観点では、地震以外のシミュレーションへの展開の余地があると言え、風水害、津波、避難のシミュレーションへの活用が進められている。

②　**海外の事例**

次に海外の動向として、代表的な事例を2つ紹介したい。1つは前述のダッソー・システムズによるバーチャル・シンガポールである。2015年のプレスリリースで、シンガポール国立研究財団とバーチャル・シンガポールを共同開発すると発表した(10)。仮想空間上でシンガポール全体の形状のデータを登録して、現実と似た空間をコンピュータの中で構築した。単にそのまま作るのではなく、これから行う予定のビルの建設や、バスのダイヤを変更のシミュレーションを行い、どのような計画が適切かをわかりやすく検討することができる。また、携帯電話の基地局と協力して様々なデータを連携させることで、市民へのサービス向上に繋げることも今後の狙いの1つだと言われている。米国の事例では、カリフォルニア大学バークレー校の Soga ら(11)は、コンピュータの中で構築した都市を対象に、主に災害時の人の避難のシミュレーションに関する研究を行っている。これらは一部であるが、従来の建設業に関わる業種だけではなく、主に製造業で実績のあるソフトウェアベンダーや、GPU を主要製品としている NVIDIA のようなハードウェアベンダーも参画していることが興味深い。

このように、都市全体のデータを管理したり、そのデータを使って物理シミュレーションをしたりする狙いは、全世界的な流れであり、今後も加速すると考えられる。しかしながら、データ管理に重点が置かれたり、成果が一部の物理シミュレーションのみであったり、まだ研究レベルであり、産業利用がまだ進んでいない等、今後まだまだ発展が期待される技術である。

(2)データとシミュレーションを繋ぐ新たな取り組み　都市丸ごとのシミュレーション技術研究組合

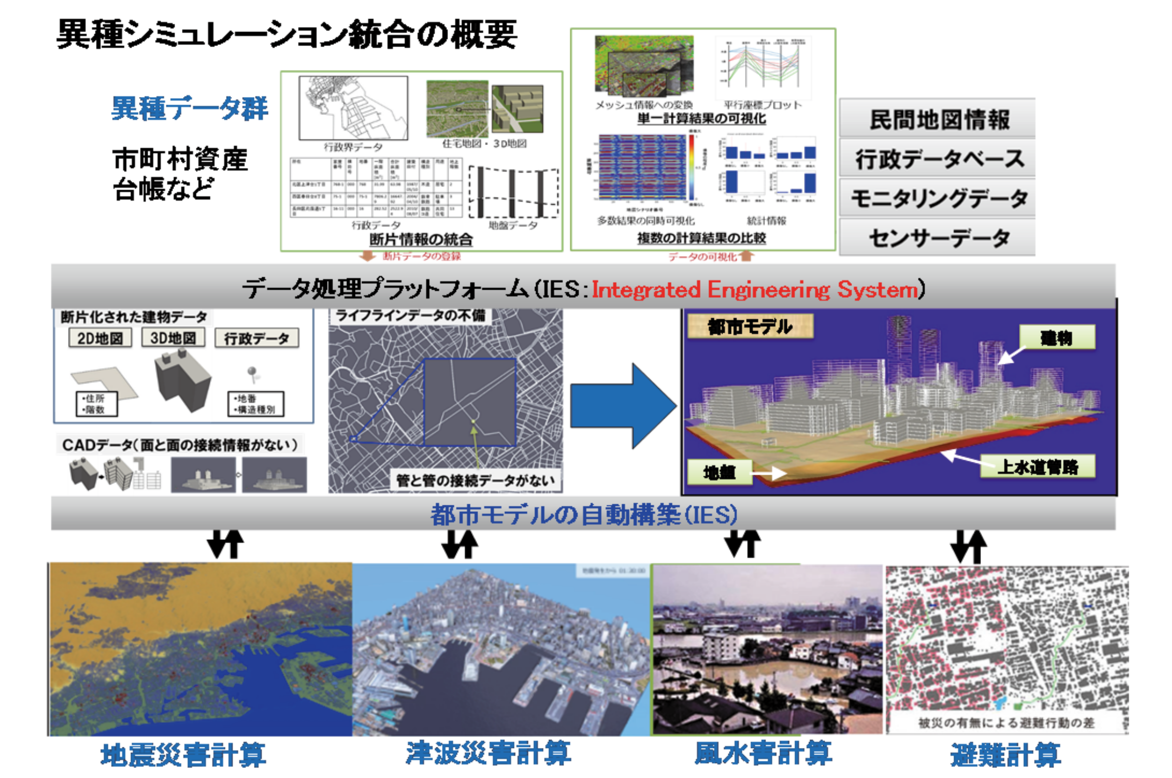
「都市の動きを丸ごと予測できるか」という問いに対しては、先に紹介した都市レベルの地震シミュレーションやデータ管理に代表されるように、様々な研究開発がなされているが、正直「一部はできる部分があるが、まだできないことが多い」と言わざるを得ないだろう。しかし、データと物理シミュレーションを併せて活用す

ること、様々な業種のメンバーの協力がその実現に向けた重要な一歩であると言えよう。

先の統合地震シミュレータであるIES等の社会実装、産業利用を通じ、我が国の技術レベルや競争力の向上の可能性、必要性を踏まえ、神戸大学飯塚教授らは数年の構想を経て2019年に「都市丸ごとのシミュレーション技術研究組合」(以下、技術研究組合)を立ち上げた。2020年6月時点で、大学、国研、ゼネコン、建設コンサル、ソフトウェア等様々な業種から3個人、14社、3団体が参画している。

技術研究組合の構想を図表5に示す。堀らが提案、整備したIESを略称はそのままとし、さらに大きな枠組みとして新しいIES（統合エンジニアリングシステム、Integrated Engineering System）の構築と社会実装を目指し、地震のシミュレーションに留まらず、津波、風水害、避難シミュレーションを統合するだけでなく、国土交通データプラットフォームとの接続により、維持管理や積算に資するデータ連携、利活用も見据えている。前節で述べたように、一つ一つの物理現象をシミュレーションするソフトは民、学を中心に開発が進められており、また自社のためのデータ管理用にも汎用のソフトが展開されている。しかしながら、ユーザーが自分の用途に応じて多種多様なデータを検索して、取得できること、また取得したデータをユーザーの用途に応じて変換、統合して活用するための仕組み作り、さらにはそれらを実行できる人材育成についてはまだ発展の余地があり、技術研究組合としてはこれらの課題解決が特に重要と考えている。これまでは限られた専門家だけが長

図表5　都市丸ごとのシミュレーション技術研究組合の構想



（資料）神戸大学都市安全センター飯塚教授作成

い時間をかけてデータを統合してようやく1ケースの地震のシミュレーションを行うことができたのだが、データ変換、統合の技術開発や人材育成を進めることができれば、相応の経験を積んだ担当者ならば短時間でデータを作成し、多数の地震シミュレーションに留まらず、その他の物理シミュレーション、データ分析が可能となる。

国土交通データプラットフォームについては今後さらなる開発が進められ、APIを通じて様々なデータやソフトを繋ぐことにより、ユーザーが多くのメリットを享受できるようになるだろう。技術研究組合は東京大学i-Constructionシステム学寄付講座、理化学研究所他と協力をしながら研究を進めるとともに(12)、データとシミュレーションを融合させた技術開発、社会実装を目指している。

5. おわりに

国土交通データプラットフォームはその構想の発表から1年でv1.0が公開され、誰もがアクセスでき、多くのデータを入手できるようになった。また、2020年6月に、理化学研究所が開発主体として開発・整備を進めているスーパーコンピュータ「富岳」が、世界のスーパーコンピュータに関するランキングで、その性能の高さで第1位を獲得した。このように、プラットフォームやハードウェアの整備が急速に進んでいる中で、今後は民間各社や研究機関において各種のデータ・物理シミュレーションのソフト等と、国土交通データプラットフォームとの接続が行われると考えられる。全体の整備されるまでにまだ数年要すると考えられるものの、データ統合に関する技術開発や人材育成を進めることにより、都市丸ごとの予測を行える未来が近くやってくるはずである。

注

(1) https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000592.html
(2) あるサービスの機能や管理するデータ等を他のサービスやアプリケーションから呼び出して利用するための接続仕様等(国土交通省資料による)。
(3) https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000687.html
(4) https://www.mlit-data.jp/platform/
(5) ICTの全面的な活用(ICT土工)等の施策を建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、もっと魅力ある建設現場を目指す取組(国土交通省HPによる)。
(6) Connected（コネクティッド）、Autonomous/Automated（自動化）、Shared（シェアリング）、Electric（電動化）の略。自動車の代表的な次世代技術、サービス。
(7) 3DEXPERIENCEは、ダッソー・システムズ(Dassault Systemes)もしくはダッソー・システムズの子会社の米国およびその他の国における登録商標です。

(8) 藤田, 市村, 堀, M. L. L. Wijerathne, 田中, “多数の地震シナリオに対する高分解能な都市震災想定のためのHPCによる基礎検討”, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol.69, No.2(応用力学論文集Vol.16), I_415-I_424, 2013.
(9) 防災科学技術研究所強震観測網(K-NET, KiK-net) https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/
(10) https://www.3ds.com/ja/press-releases/single/dassault-systemes-and-national-research-foundation-collaborate-to-develop-the-virtual-singapore-pla/
(11) Soga K, Casey G, Kumar K and Zhao B (2018) Briefing: High-performance computing for city-scale modelling and simulations. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Smart Infrastructure and Construction 170 (4): 80.85, https://doi.org/10.1680/jsmic.17.00026
(12) 全, 小坂部, 田嶋, 亀田, 大谷, 堀, “インフラデータプラットフォームでのデータ連携効率化のための基礎的研究”, 第2回「i-Constructionの推進に関するシンポジウム」, 2020.

技術動向レポート

UPACS を活用したターボ機械分野向け流体解析システム開発

情報通信研究部
シニアコンサルタント　松村　洋祐

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)が開発した流体解析ソフトウェアUPACS を基に、ターボ機械分野向け、特に遠心圧縮機を対象として、従来は解析が困難であった低流量域を含む広い作動範囲の性能を解析することを目的とした流体解析システムを、JAXAとみずほ情報総研が共同で開発した。

1. 背景

機械と流体の間でエネルギーを変換する流体機械のうち、回転する翼列などを用いて連続的にエネルギー変換を行うものをターボ機械という。主なものとして、ジェットエンジン、ガスタービン、蒸気タービン、ファン、ポンプ、水車、風車などが挙げられ、幅広く利用されている。ターボ機械の一種である遠心圧縮機[(1)]は、コンパクトでありながら空気流量が大きく圧力比が高い。そのバランスの良さや作動範囲の広さから、石油精製プラント、化学プラント、天然ガスプラント、製鉄プラントなどの各種プラントや空気源、小型ガスタービン、ターボチャージャーなど、様々な機械の心臓部として利用されている。

ターボ機械メーカは、遠心圧縮機の設計において流体解析ソフトウェアを用い、一般性能(作動条件に対する出力や効率等)や圧縮機内部の流動パターン等をシミュレーションにより評価している。遠心圧縮機の大流量域の解析に関しては、従来の流体解析方法を用いる市販の流体解析ソフトウェアにより、ある程度良好な解析結果を得られるものの、低流量域で発生する流体振動現象(旋回失速[(2)]やサージ[(3)])については、その流動現象の複雑さから設計に充分に資する精度の解析結果を得ることが困難である。低流量域の振動現象は遠心圧縮機本体や管路系の疲労や破壊につながるため、ターボ機械メーカではシミュレーションによる充分な解析結果が得られない中、安全マージンを大きく取って頑丈な構造にする、作動範囲を狭める、などの対応を行っているのが現状である。この課題に対しては、複雑な流動現象を解析できるDES[(4)]などの最新の流体解析技術を活用することにより、遠心圧縮機性能のより正確な予測と低流量域における振動現象の解明に期待がかけられている。

また、一般的に市販の流体解析ソフトウェアについては、使用する計算機が企業内の小規模なPCクラスタに限定され、解析規模に応じて増大するライセンス費用の制約もあり、大規模解析や多ケース解析が困難である。また、ソフトウェア内部での処理の詳細が明らかではなくブラックボックス化する傾向があり、解析結果の解釈が難しいなどの問題点もある。

これらの課題解決に対する機械産業分野でのニーズを踏まえ、航空機、航空用ジェットエンジン、ロケットの研究開発用にJAXAが開発し

た流体解析ソフトウェア UPACS[5] を基に、ターボ機械分野向け、特に遠心圧縮機を対象とした流体解析システムを JAXA と共同で開発した。UPACS は、世界でも有数の研究機関である JAXA が最新・最先端の研究成果を取り込んで開発した、スーパーコンピュータでの大規模解析の実績を有する流体解析ソフトウェアである。

なお、本共同開発は、JAXA 産業振興に資する共同研究制度に基づき行った「流体解析ソフトウェア UPACS を活用したターボ機械分野向け流体解析システム開発」(実施年度：2017～2019年度)により、みずほ情報総研と JAXA が共同で実施したものである。

2. 開発項目

本開発では、市販流体解析ソフトウェアでは解析が困難な、遠心圧縮機の低流量域を含む広い作動範囲の性能を解析できる流体解析ソフトウェアを開発することを目的とした。

具体的には、UPACS の CFD ソルバーに関して、(1) 境界条件の改良や (2) 遠心圧縮機への適用に際する解析ノウハウの蓄積を行った。さらに、(3) UPACS に含まれる格子生成ツール MBGG[6]、modifyGrid[7] を活用した遠心圧縮機用格子生成の技術課題の解決を行った。また、(4)チュートリアルデータの作成等のパッケージ整備を行った。

開発した流体解析システムを用い、(5)遠心圧縮機の性能予測と(6)並列効率の評価を行った。

3. 成果

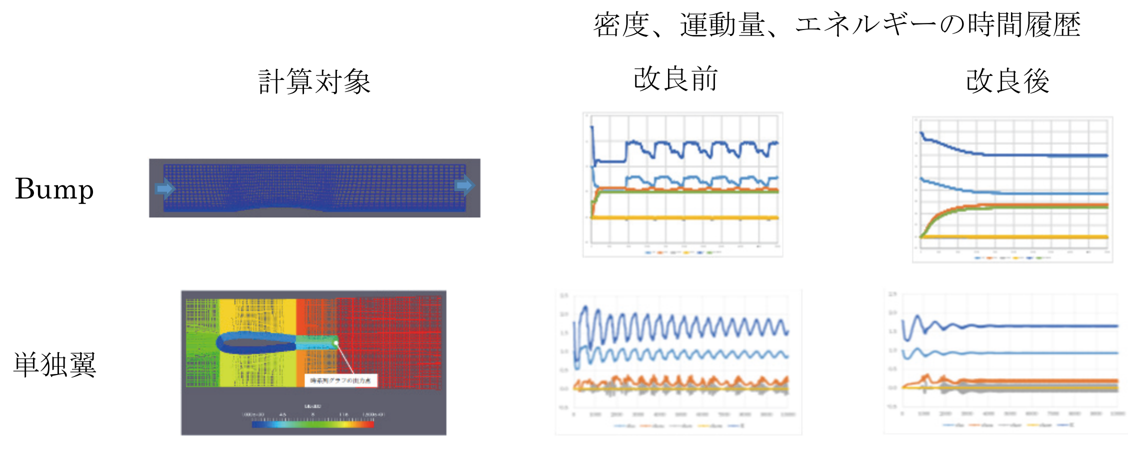
(1) CFD ソルバーの境界条件の改良

ターボ機械内部流れ解析で多用される流量指定境界条件を使用する際、数値的な振動が起きる場合があるため、対策を行った。

流量を物理的境界条件として与え、それと圧縮性流体力学の「特性の方法」を組み合わせて、流出境界面の物理量を求める。ただし、流出境界面では音波が完全に反射されるため、流れ場が振動しやすくなる。そこで、境界面上の流束を、境界面より内部領域の流束で緩和させることで振動を抑制した。

改良した境界条件計算法を単純形状(Bump、単独翼)に適用しその効果を確認した。また、後述するように、遠心圧縮機に対しても適用し、性能曲線の右上がり特性が再現できることを確認した。

図表1　流量指定境界条件の改良の効果



（資料）みずほ情報総研作成

(2)遠心圧縮機への適用に際する解析ノウハウの蓄積

ターボ機械内部流れ解析において乱流渦による損失を正しく評価するためには、瞬時流れ場で乱流渦を解像できる必要がある。しかし、従来行われていたRANS解析のみならず、Roeスキーム(8)によるDES解析でも、乱流渦を解像することができていなかった。

そこで、SLAUスキーム(9)について回転系への対応を行い、DESによる遠心圧縮機の非定常乱流解析を実施した。これにより、瞬時流れ場での乱流渦を解像できることを確認した。

(3)遠心圧縮機用格子生成に際する技術課題の解決

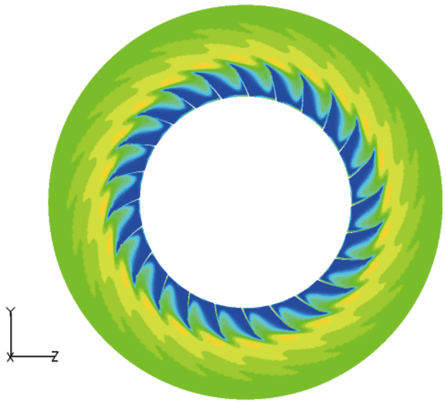
遠心圧縮機のような3次元的に捩れた複雑な形状に対する大規模格子を効率的に生成する手法は確立されておらず、格子生成に熟達していない技術者がそのような格子を現実的な時間内に作成することは困難である。この課題に対応した。

まず、JAXAの開発した軸流ターボ機械用格子生成ツールMBGGを遠心圧縮機に対応させた。具体的には、流路断面の与え方が軸方向座標の関数となっていたものを、入口と出口を結ぶ曲線の関数に変更した。これにより、格子生成に熟達していない技術者でも、現実的な時間内に複雑形状に対する高品質な3次元格子の作成が可能となった。

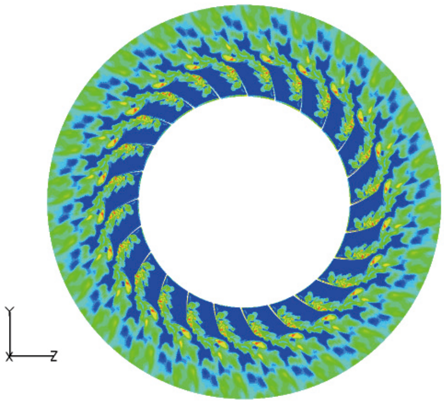
また、MBGGは微分方程式法に基づく格子生成ツールであるため、DES解析等で必要とされる大規模な格子の作成には計算時間がかかる。そのため、JAXAの開発した代数的手法に基づく格子細分化ツールmodifyGridと連携させることとした。ただし、modifyGridでは格子ブロック境界への指定のみで格子密度の制御を行うため、拘束条件が多くなるO型格子や周期境界では制御が困難であることが分かった。そこで、modifyGridに新たな機能を拡充し、翼面に垂直な方向についてはすべての格子線の密度分布を直接制御できるように機能を追加した。

これにより、MBGGでつくられた高品質の格

図表2　解法によるエントロピー分布の解像度の違い



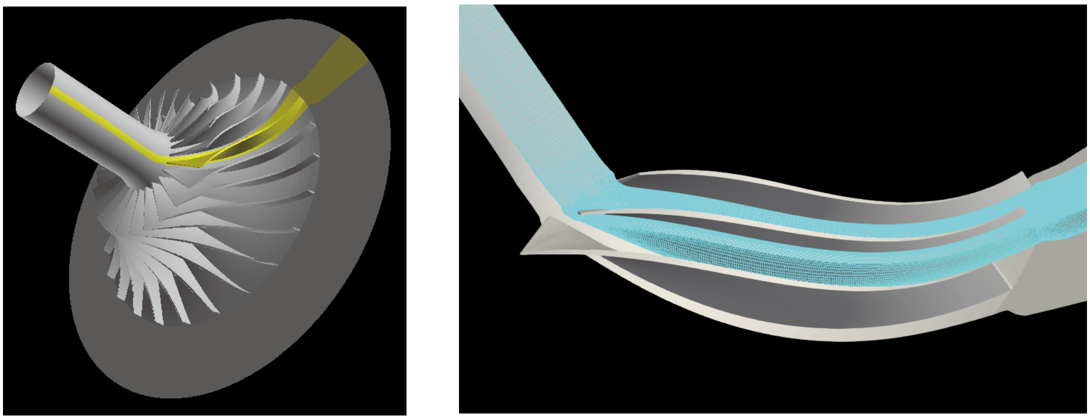
RANS
格子点数:580万点
流量 3.73kg/s, 圧力比 4.33



DES (SLAUスキーム)
格子点数:3560万点
流量 4.63kg/s, 圧力比 4.60

（資料）みずほ情報総研作成

図表3　遠心圧縮機格子図（圧縮機形状はKrainら[10]より引用）



遠心圧縮機インペラ格子　　　　翼周り拡大図

（資料）みずほ情報総研作成

子をベースとして、modifyGridによってその格子密度分布を制御する、という両者のメリットを活かす考え方で、大規模な格子を作成する手法を確立した。

(4)チュートリアルデータの作成

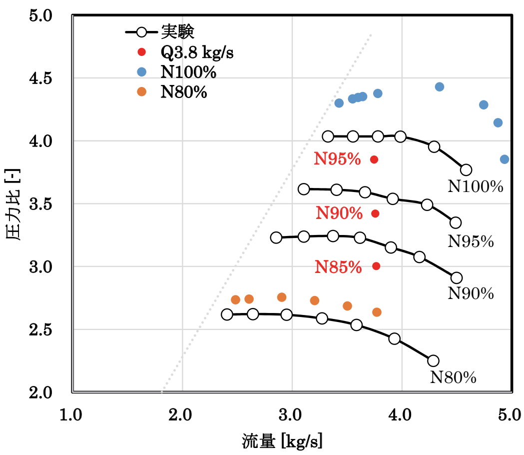
UPACSによる遠心圧縮機内部流れ解析における、CFDソルバーおよびその前後処理を含む一連の計算手続きをまとめたチュートリアルデータを作成した。これにより、これまでUPACSを利用したことのないユーザでも、UPACSによる解析に必要な準備や操作を効率的に理解し、解析を容易に立ち上げることができる。また、チュートリアルデータに含まれる実行スクリプトを利用することにより、前処理から解析の実行、後処理までを一括で実行することも可能である。

(5)遠心圧縮機性能予測

改良したUPACSを使用して、遠心圧縮機のRANS解析を行い、実験結果と比較した。

その結果、回転数100％では、性能曲線の右上がり特性が再現できているが、市販の流体解析ソフトウェアと同様に、実験結果より圧力損失を過少に見積もる傾向があることがわかった。ただし、回転数80％では実験結果とより一致した。これらより、旋回方向の流れによって圧力損失を増やす要素が実験に含まれている可能性が示唆される。今後、より信頼性の高い実験データとの比較が必要と考える。

図表4　遠心圧縮機の性能曲線（実験値はKrainら[10]より引用）



（資料）みずほ情報総研作成

なお、SLAUスキームによるDES解析でも、性能曲線上の動作点はほぼ変化しなかった。DES解析を行わなくともRANS解析によって

性能特性の予測自体は可能であることがわかったが、低流量域での振動現象などの非定常現象を捉えてユーザのニーズに対応するためには、DESによる非定常解析が必須である。

(6)並列効率の評価

改良したUPACSのCFDソルバーについて、strong scaleのベンチマークテストを実施した。これにより、少なくとも1024コアという大規模まで実行性能がリニアに上がることを確認した。

DESによる非定常解析などの大規模な解析を行うためには、並列効率の高さが重要となる。UPACSはスーパーコンピュータでも高速に動作するよう設計されていることから、市販の流体解析ソフトウェアより高い並列性能を持つということが実証できた。

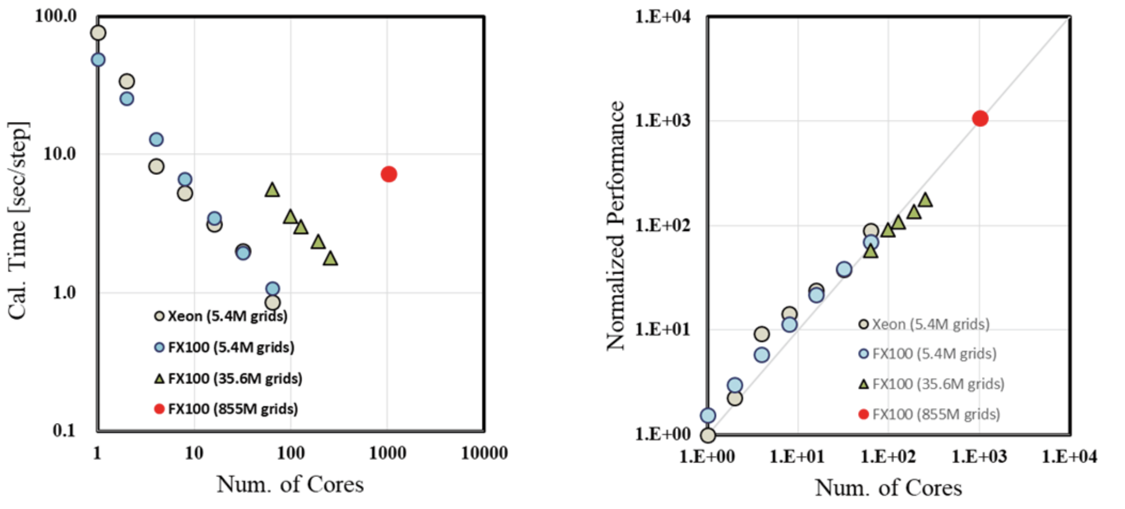
4. まとめ

JAXAが開発した流体解析ソフトウェアUPACSを基に、ターボ機械分野、特に遠心圧縮機向けの流体解析システムを開発した。

開発された流体解析システムのCFDソルバーは、市販の流体解析ソフトウェアと比較して高い並列性能を持ち、DESによる非定常解析などの大規模な解析も実行可能である。また、改良した格子生成ツールにより、格子生成に熟達していない技術者でも、遠心圧縮機のような3次元的に捩れた複雑な形状に対する大規模格子を効率的に生成する手法を確立した。さらに、チュートリアルデータの作成等のパッケージ整備により、これまでUPACSを利用したことのないユーザでも、解析を容易に立ち上げることを可能とした。これらにより、UPACSをターボ機械分野、特に遠心圧縮機に適用する基盤を構築できた。

なお、この流体解析システムは、2020年度内に販売を開始する予定である。

図表5　ベンチマークテスト結果



計算時間　　規格化した実行性能

（資料）みずほ情報総研作成

注

(1) 流体を軸方向から流入させ、インペラと呼ばれる羽根車で流体にエネルギーを与え、半径方向に流出させて高圧にする圧縮機。

(2) ターボ機械の低流量域で起きる不安定現象の一つ。流量を低くしていくと、一部の翼列に失速が発生する。この失速が成長すると翼間の流路が閉塞される。この失速領域が翼列の回転方向に伝播していく現象。

(3) ターボ機械の低流量域で起きる不安定現象の一つ。ターボ機械と配管等を含めた系全体が自励振動を起こし、逆流を含む周期的な変動となる現象。

(4) DES（Detached Eddy Simulation）壁面近傍など乱流スケールが小さい領域はRANS（Reynolds-averaged Navier-Stokes equation）、それ以外の領域はLES（Large Eddy Simulation）で計算する手法。非定常計算が可能であり、LESよりも格子点数を少なくできる。
RANSは時間的に平均化された基礎方程式を解く手法。格子サイズにかかわらずすべての乱れがモデル化されて計算される。非定常計算には向かない。
LESは空間的なフィルターをかけた基礎方程式を解く手法。格子サイズより大きな渦は直接計算で、小さな渦はモデル化されて計算される。非定常計算が可能であるが、RANSよりも格子点数が大幅に増加する

(5) 山本 一臣，高木 亮治，山根 敬，榎本 俊治，山崎 裕之，牧田 光正，岩宮 敏幸「CFD共通基盤プログラムUPACSの開発」第14回数値流体力学シンポジウム講演論文集 D02-1（2000年）

(6) Yamamoto, K. and Engel, K.「Multi-block Grid Generation Using an Elliptic Differential Equation」AIAA Paper 97-0201（1997年）

(7) Koizumi, H., Tsutsumi, S., Takaki, R., Yamamoto, K., Ito, H., Abe, M. and Matsumura, Y.「Automated Massively Refinement Technique for Multi-block Structured Grids Based on NURBS Volume」AIAA 2015-2295（2015年）

(8) 対流項の数値流束の算出方法の一つ。Riemann流束の近似解としてRoe平均を使用する。

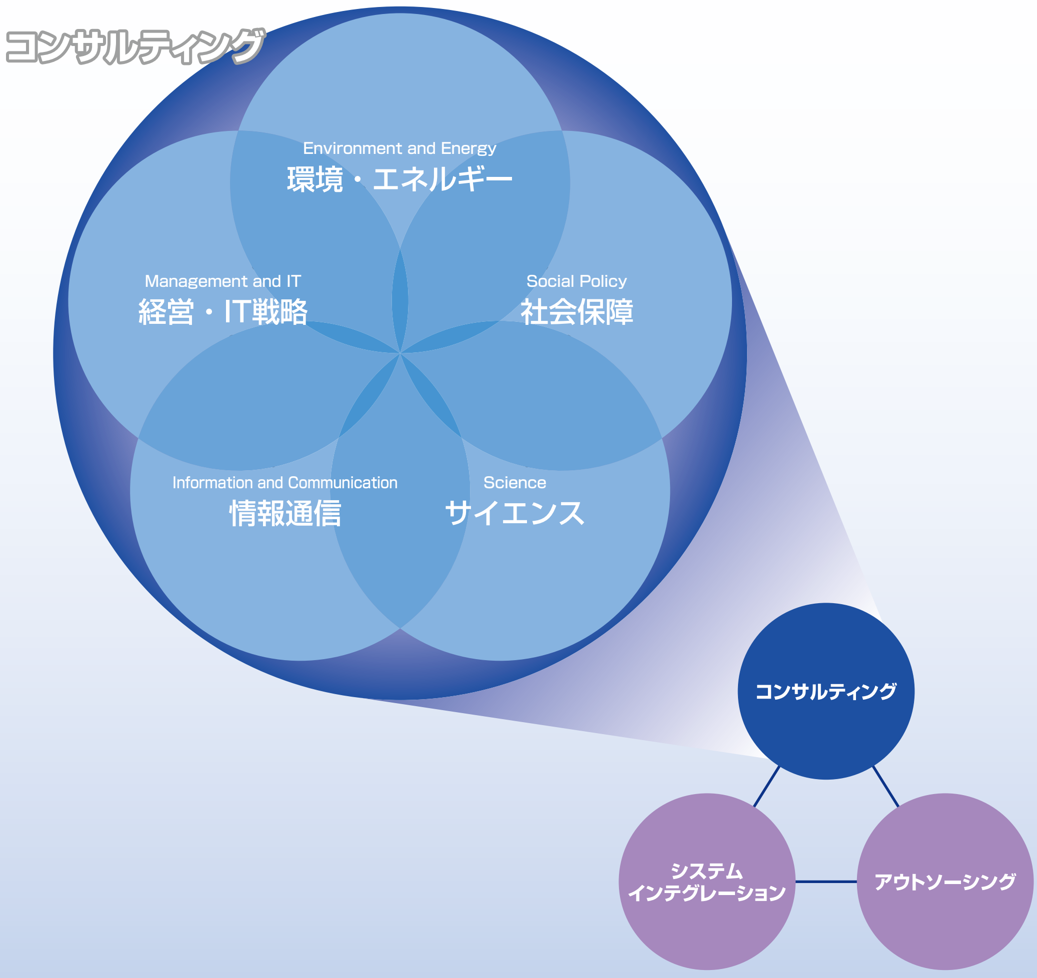
(9) 対流項の数値流束の算出方法の一つ。流束を移流と圧力に分離して扱う。Roeスキームより数値粘性が小さい。

(10) Krain, H., and Hoffman, W.「Verification of an Impeller Design by Laser Measurements and 3D-Viscous Flow Calculations」ASME Paper 89-GT-159（1989年）

未来への道に横たわる
さまざまな課題を飛び越えていく

そこで役立つのは、
みずほ情報総研コンサルティンググループが提供する、
多様な専門知識と豊富な経験というエンジン。

社会が、企業が未来へと進んでいくその途上には、さまざまな課題が現われます。
これらの課題は多種多様で、幅広い分野にまたがるものがほとんどです。
社会学、情報学、経営学、環境学…。適切に課題に対処するためには、多岐にわたる知識が必要です。
みずほ情報総研コンサルティンググループには、多種多様な専門知識と、
幅広い分野での経験を積んだ課題解決の専門家が在籍。磨き上げられたビジネス理論で、
画期的なITシステムで、精緻な先端科学技術で――、さまざまな側面から、課題解決のお手伝いをいたします。



みずほ情報総研レポート　vol.20　2020年10月30日 発行

発行：みずほ情報総研株式会社　コンサルティング事業推進部
〒101-8443　東京都千代田区神田錦町2-3
info@mizuho-ir.co.jp　電話：03-5281-5301
http://www.mizuho-ir.co.jp/

Copyright © 2020 Mizuho Information & Research Institute, Inc. All rights reserved.
無断転載を禁ず。本誌に掲載の記事・写真・図表などは、著作権法によって保護されており、
無断で転用・転載・複製することはできません。

みずほ情報総研レポート

MIZUHO　みずほ情報総研株式会社