



# 2030年代の未来生活を支える Beyond 5Gとは？

国立研究開発法人情報通信研究機構 Beyond5G研究開発推進ユニット

いしづ けんたろう  
石津 健太郎



## 1. はじめに

現代の生活基盤は、スマートフォンなどに見られるように便利になったことは疑う余地もない。しかし、産業の営みはますますグローバル化し、情報通信技術の重要性がますます増す中で、あるべき社会に向けて進化しているだろうか。多様なサービスが求められるこれからの社会では、企業や個人が持つ多様な機能が適切に組み合わせられ、複雑な問題の解決に貢献していかなければならない。現在、その仕組みが無いために、せっかくの多様で先進的な機能に活躍の場が与えられず、それが社会の閉塞感につながっているのかもしれない。

2030年ごろからの実現が期待される次世代通信システム Beyond 5G<sup>[1]</sup>は、単に移動通信を可能にするネットワークシステムの延長としてだけでなく、情報通信産業を超えてオープンイノベーションを生むためのサービスプラットフォームとして大きな役割が期待されている。本稿では、Beyond 5Gが単に情報通信の性能を向上させたシステムではなく、異なる事業者や産業が持つ多種多様なシステムを有機的につなぐ仕組みとしての役割を担う可能性を指摘し、具体的にアーキテクチャを示して説明していく。

## 2. モバイル通信の進化

### 2.1 インターネットの登場とモバイル通信の進化

インターネットを含む情報通信ネットワークは世界中の様々なサービスに活用され、今や生活には欠かせない重要な社会基盤である。移動しながらインターネット接続を可能にするモバイル利用は、2000年代に入ってから第2世代・第3世代移動通信システムなどにより徐々に一般向けのサービスとして提供され始めた。その後にスマートフォンという高機能な個人向け情報処理端末が普及し、さらに、2010年ごろから第4世代移動通信システムが通信速度を向上させたことにより、多くの人がいつでもどこでもインターネットにアクセス可能になった。これが社会生活におけるモバイル通信の必要性を決定的なものにした。その後、日本では第5世代移動通信システム（5G）によるサービスが2020年に開始され、単に通信速度の向上だけでなく、それに続く形で通信遅延や接続数の観点からも機能拡張に向かいつつあ

る。このため、5Gの時代である2020年代には、情報通信がモノの制御にまで浸透していくことが予想される。それでは、その後のBeyond 5G時代はどのような未来生活が待っているのだろうか。

### 2.2 Society 5.0を支えるCPSの概念

2030年代には、我々の生活は仮想世界（サイバー空間）と現実世界（フィジカル空間）が融合された情報通信システムにより支えられ、人間が身体的・物理的な限界を越えて活動することができると期待され、この概念はSociety 5.0<sup>[2]</sup>として提唱されている。

サイバー空間とは、現実空間からセンシングされる情報に基づきコンピュータの上に再現された空間であり、データを蓄積し、人工知能や機械学習により事象を予測する。一方で、フィジカル空間とは、我々が実際に生きている空間であり、サイバー空間から最適にアクチュエーションを行うことにより、サービスを実現する上で最適な機能構成やパラメータ設定に反映していく。このようなシステムをサイバー・フィジカル・システム（Cyber Physical System：CPS）と呼び、社会に新たな価値を生み出していく基本概念である。サイバー空間とフィジカル空間の情報と制御は循環的に繰り返され、持続的に動作することが想定されている。

CPSにより現実世界の把握と仮想空間による分析が進めば、電波、電力、空間などの様々な資源の利用を全体として最適化することができる。

### 2.3 Beyond 5Gと6Gの違い

第5世代（5G）の次に実現される第6世代（6G）の移動通信システムは、2030年ごろにサービスが始まると予想されている。一方で、Beyond 5Gもそのころから活用されるシステムの名称として使われる。特に海外では6Gと呼ぶ場合が多く、Beyond 5Gは日本発の用語である。それでは、6GとBeyond 5Gの定義の違いは何だろうか。筆者が知る限り、それは2つの定義で語られることが多い。

1つ目は、第1世代から続いてきた延長線上に5Gや6Gがあり、Beyond 5Gは5Gよりも向こうにある複数の世代（つまり6G以降の6G、7G、8G、…）のシステムを総称したも



のという定義である。研究開発が進められている技術の実用化時期は、ビジネスに左右される側面も大きい。それが10年後になるか20年後になるかの予想は難しく、技術が使われる世代を特定せずに、2030年以降の世代という意味を込めてBeyond 5Gと呼ぶというわけである。

2つ目は、情報通信インフラの役割を単にこれまでの世代の延長線上で考えることはできず、Beyond 5Gは6Gを含みながらもさらに広い概念を持つシステムという定義である。5Gまでの移动通信システムは、あくまでも通信サービスを提供するためのものであったが、2030年以降は5Gが持つ性能を単に向上させるだけではなく、新しい価値をもたらす特徴が求められ、従来のモバイル通信の世代では語ることができないという主張である。つまり、移动通信システムが多様な産業のサービス基盤となる意味合いが強まり、異分野技術やアプリケーション技術も合わせて捉える必要があるということだ。

このようにBeyond 5Gには複数の意味が込められつつあるが、それだけ注目を集めているシステムであり、社会に本質的な影響を与える可能性が高いということの表れであろう。

### 3. 2030年代の未来生活

Beyond 5Gに必要な技術の範囲は相当広い。したがって、まずBeyond 5Gが使われる2030年代の未来生活を想像し、現時点で研究開発が必要となる課題やロードマップをそこから抽出して設定する必要がある。本章では、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）が公開したBeyond 5G/6G ホワイトペーパー<sup>[3] [4]</sup>に基づき、2030年代に想像されている未来生活の一端を紹介する。

ホワイトペーパーに登場するシナリオは、人型ロボットを遠隔操作して生活する、月面都市を建設する、物流や交通が上空を活用する、などのように現在の生活からは一見してかけ離れたように見える物語かもしれない。しかし、既に障がい者がロボットで接客するカフェ<sup>[5]</sup>が実現し、NASAのアルテミス計画<sup>[6]</sup>やSkyDrive社の空飛ぶ車<sup>[7]</sup>の取組みが始まる中、一定の根拠を持つ2030年代の生活シナリオであると考えている。なお、このホワイトペーパーは、2020年夏ごろからNICT内で研究者を中心にした有志が集まり、未来生活や必要な要素技術に関する議論を重ねて執筆を行ったものであり、執筆時期は第1版が2021年3月、現在の最新版である第2版は2022年3月である。

まずは、3つのシナリオの一部を以下に示す。

#### シナリオ1：Cybernetic Avatar Society

このシナリオは、2035年における企業の技術開発課長が記した日記という形式で示している。遠隔から乗り移って活動できる人型ロボットを活用し、生活スタイルが大きく変わる可能性を示している。

9：30からの遠隔会議では、新製品のプロトタイプを社長にプレゼンする。現代のテレビ会議では伝えることが不可能な触り心地を感触グローブにより伝えることで、京都の自宅から東京にいる社長の承認を得ることができる。

11：30にはタイの製造工場で緊急トラブルが発生する。従来であれば海外出張して自分の目で見て原因解決していたところだが、現地のアバターロボットに乗り移って装置を確認できたので、大きく時間の節約ができた。

12：00からの昼食では、仕事で忙しくて帰れない実家の父親を遠隔で身体介助し、会話しながら食事を楽しんだ。

13：00には息子の授業参観があるが、社内会議と予定が重複してしまう。会議と授業参観に2台のアバターロボットを使い分けて参加し、状況に応じてモードを切り替えて対応する。

#### シナリオ2：月面都市

このシナリオは、月面都市を建設する際の作業従事者に着目し、その活動の様子を示している。月面都市の建設とはいえ、100人の宇宙飛行士を送り込むわけにはいかない。技術を駆使してどのように建設工事をしているのかを描いている。

建設作業は多くの月面に存在する多くのアバターロボットと、現地に滞在する少数の宇宙飛行士が協力して行う。アバターロボットは地球上の各地から遠隔操作できるため、月面の建設作業とはいえ、作業者は夕方になれば自宅で家族と過ごすことができる。物理的に超えられない地球と月の間の往復3秒の通信遅延はAI行動予測により補償され、スムーズで正確な操作が可能になる。作業に当たり必要な月面の位置把握は、地球上でしか使えないGPSに代わって高精度な測定装置が導入される。

#### シナリオ3：時空を超えて

このシナリオは、生活の活動範囲が地表面だけでなく、上空や海上を含めた3次元空間に拡張されていく新しい生活スタイルを示している。

テレビ会議は端末のディスプレイから空中へのホログラム表示が可能になり、簡易な会議であれば公園で娘と時



間を過ごしながら仕事をこなすことができる。上空では、宅配ドローン、個人用スカイカー、大型輸送機が空間を使い分けている。父親を訪問するためのスカイカーは、物流用ドローンが多く飛行する中でも、安全に自動航行が可能だ。様々なセンサで得られた位置情報や気象情報の活用が安全な飛行に役立っている。

以上のように、Beyond 5Gは未来生活をより便利に変えていくと期待している。一方で、技術の導入には常に光と影が存在することを忘れてはならない。新たな技術により生活様式が変わり、これまでの制度や倫理をそのまま当てはめて考えることができなくなる懸念もある。このような倫理的・法制度的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues, ELSI）は、技術の研究開発との両輪として議論が必要である。Beyond 5G時代に顕著化する課題を今のうちから考え、対応方法を準備しなければならない。そのような検討の端緒とするため、以下のシナリオがある。

#### シナリオ4：サイバー世界の光と影

このシナリオは、メタバースでの活動の増加に伴い発生した社会問題に着目し、サイバー世界での生活が広がる中で必要になったメタバース専門の診療カウンセラーから見た問題点を示している。

1人目の患者は保険販売員である。AIの推薦に基づき保険商品を販売するものの、AIの分析結果に納得できない顧客との間で折り合いの付け方が難しい。仕事のツールであるAIに不信を持ち始めるばかりか、サイバーとリアルの違いもつきにくくなっているようだ。

2人目の患者は、趣味の時間の多くをメタバース上の友人と過ごし、抜け出せなくなった。仕事上でもメタバースを通じた工場作業を行っており、仕事中は自分の能力が大きく感じられる一方で、仕事後には現実に戻り喪失感を持つなど、メタバース特有の依存症に悩んでいる。

なお、これらのシナリオはBeyond 5Gを共に考える異業種（通信分野以外）の方々や非専門家との議論にも役立つと考え、動画による説明もできるようにした。YouTubeにも掲載しているので、興味がある方はご覧いただきたい<sup>[8]</sup>。

## 4. Beyond 5Gの技術と多様化

### 4.1 多様化する要素技術

前章のように未来生活のシナリオを描き、技術の利用場面を分析することにより、Beyond 5Gに求められる要素技術を整理した（表）。T1とT2のように通信そのものの性能を向上させるものや、T3のように通信システムの融合を行うもの、T4のように通信エリアを宇宙や海上、海中に拡大するもの、などがある。また、T5のようにCPSを有効に活用するために、時刻の同期や位置の同定を高精度に行うものや、T6のように通信のセキュリティや耐障害性に関わるものもある。さらには、T7のようにアバターロボット、言語翻訳、自動運転、ドローンの高度化のようなアプリケーションや革新的なデバイスの実現に関わるものもある。当然のことであるが、Beyond 5Gの要素技術はこれに限らず増え続けるし、限られた企業や研究機関によりすべてが実現できるものではない。

■表. Beyond 5Gの要素技術の例

|                               |                            |
|-------------------------------|----------------------------|
| T1. 超高速・大容量通信                 | T5. 時間同期                   |
| T1.1 テラヘルツ波                   | T5.1 無線時間同期                |
| T1.2 オール光ネットワーク(大容量光ファイバ通信)   | T5.2 原子時計チップ               |
| T1.3 オール光ネットワーク(光・電波融合技術)     | T5.3 基準時刻の生成共有技術           |
| T2. 超低遅延・超多元接続                | T6. 超安全・信頼性                |
| T2.1 エッジコンピューティング技術           | T6.1 エマージェンシー・セキュリティ技術     |
| T2.2 適応型無線網構築技術               | T6.2 攻撃データに基づくサイバーセキュリティ技術 |
| T2.3 適応型無線網アプリケーション技術         | T6.3 量子暗号                  |
| T2.4 電波放射空間の自律的な局所化・追尾・予約技術   | T6.4 電磁環境技術                |
| T2.5 超多段接続自律M2Mネットワーク構築技術     | T6.5 レジリエントICT             |
| T3. 有無線通信・ネットワーク制御技術          | T6.6 センシング                 |
| T3.1 ネットワーク制御技術(ゼロタッチ自動化)     | T7. 超臨場感・革新的アプリケーション       |
| T3.2 周波数の割当・共用管理              | T7.1 脳情報の読み取り・可視化・BMI技術    |
| T3.3 有線無線システム管理(ローカルBeyond5G) | T7.2 直感性の計測・伝達・保証技術        |
| T3.4 高度電波エミュレーション             | T7.3 リアル3Dアバター・五感伝達・XR技術   |
| T4. 無線システムの多層化・NTN            | T7.4 言語・非言語情報に基づくAI分析・対話技術 |
| T4.1 衛星・非地上系通信プラットフォーム        | T7.5 エッジAI行動支援             |
| T4.2 光衛星通信                    | T7.6 多言語の同時通訳・言い換え・要約技術    |
| T4.3 海上通信                     | T7.7 自動運転                  |
| T4.4 海中・水中通信                  | T7.8 ドローン                  |
| T4.5 多層ネットワーク連携制御             |                            |



## 4.2 組合せが生み出すシステムの複雑性

Beyond 5Gシステムは多種多様なシステムの集合体として構成される。Beyond 5Gのうち、フィジカル空間を構成するシステムの例を図1に示す。各分野で通信を可能にするシステムは、前節に示した各要素技術を活用して、地上における基地局に加えて、人工衛星やHAPS（表のT4）を活用することで通信エリアは上空や海洋にまで至る。地上においても、ローカル5Gを拡張したシステム（同T3）などスポット的に展開される自営型の移動通信システムやテラヘルツ波通信システム（同T1）が、光ファイバネットワーク（同T1）に支えられて一定のニーズを満たすシステムとして積極的に使われる。また、情報処理を担うクラウド・エッジ基盤（同T2）やアプリケーションとしてのアバターロボット（同T7）も登場する。

このようなシステムは、全体として見ると大規模で多岐にわたるため、常にフルセットで利用者に提供されるのではなく、利用者が必要とする機能や性能に応じて必要なシステムを選択して組み合わせ、適切に設定して提供される。例えば、地上のテラヘルツ波を活用して高容量の通信を可能にするシステムは、衛星通信により広域エリアの通信を可能にするシステムとは独立して管理され、異なる事業者が運用しているが、必要に応じてこれらのシステムは事業者を超えて組み合わせられ、利用者は1つのサービスとして利用する。

Beyond 5Gシステムは、このように多様なシステムから構成され、従来の移動通信システムとは違いその数が爆発的に増加するため、あらゆる者が多様なシステムを持ち寄るようにして構成しながら、複雑性を持ちながらスケールしていくことになる。したがって、Beyond 5Gには利用者の

ニーズに応じて適切な組合せを決定する機能や、その実行を指示する機能が重要になる。

一方で、Beyond 5Gによりサービスを提供する者は常に情報通信分野の専門家ではない。利用者にサービスを提供する者が、様々に持ち込まれるシステムをすべて理解することは現実的ではない。通信機能や情報処理機能は単にブラックボックスとして使い、先進的なサービスの創成や実装に注力したい場合がほとんどである。例えば、要求する通信品質に応じた通信システムやエッジコンピュータの選択や切替えは、専門性が高くBeyond 5G時代のサービス提供者には扱えない。

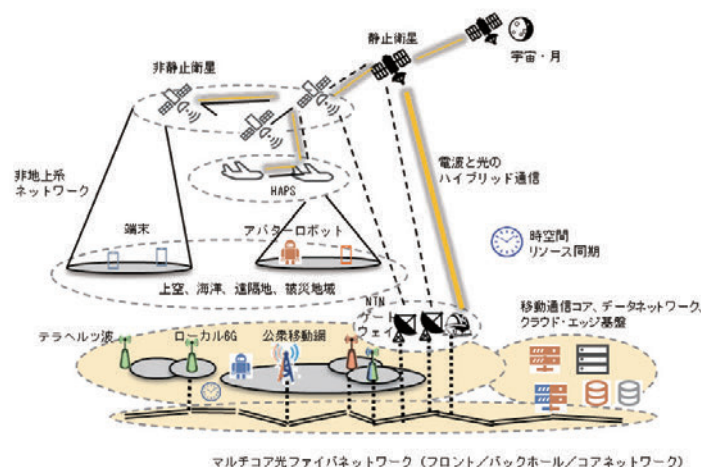
次章では、そのような課題を解決していくために、Beyond 5Gが持つべき仕組みについて述べることにする。

## 5. オープンサービスプラットフォームとしてのBeyond 5G

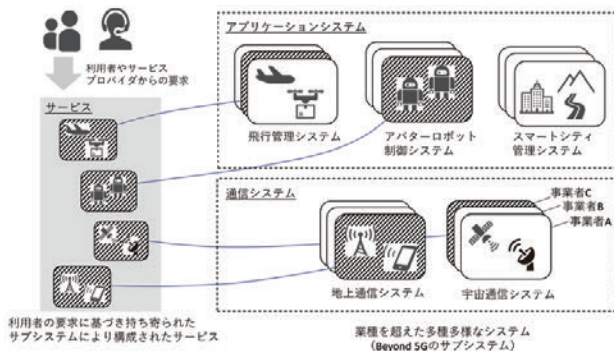
Beyond 5Gの理念は、前述してきたように5Gからさらに大きく変化する。利用者が要求するサービスを実現するために、持ち寄られた多種多様なシステムを組み合わせるという概念に着目する必要がある。Beyond 5Gは、利用者から見れば通信インフラを超えて、システムをオープンに組み合わせるサービスを構成していくためのプラットフォームとなる。その概念を実現する仕組みがアーキテクチャである。本章では、Beyond 5Gアーキテクチャの要件を整理し、それを具体化する。

### 5.1 Beyond 5Gサービス構成の概念

Beyond 5Gのアーキテクチャを検討するため、Beyond 5Gにより実現するサービスの概念を図2に示した。地上通信システムや宇宙通信システムなどの通信システムや、飛行



■図1. Beyond 5Gが想定するフィジカル空間の機能構成



■ 図2. サブシステムを持ち寄ることにより構成されるBeyond 5Gサービスの概念

管理システムやアバターロボット管理システムなどのアプリケーションシステムは、各事業者が構築して運用しているものであり、言わばBeyond 5Gサービスの部品である。そこで、これらをBeyond 5Gのサブシステムと呼ぶことにする。各事業者は機能や性能に特徴を持ったサブシステムを提供するというのである。例として、図2の宇宙通信システムには事業者A～Cによる3つのサブシステムがあるが、それぞれの特徴（通信速度、安定性、料金など）が勘案され、利用者の要求を満たすように選択されることになる。

このようにして、各サブシステムは、利用者またはサービスプロバイダ（利用者にサービスを提供する事業者）からの要求に基づき最適なものを選択され、持ち寄られて1つのサービスとして組み合わせられ、利用されることになる。

この概念に基づき、Beyond 5Gアーキテクチャに求められる要件を以下に整理する。

#### A. システム持ち寄りのためのオープン性

多様なサブシステムを持ち寄ることが可能になれば、今後開発される多様な機能を持つシステムの柔軟かつ迅速な利用が期待できる。そのためには、持ち寄りのためのインタフェースの定義が必要である。なお、持ち寄られたシステムを利用した場合は、公平にインセンティブが支払われるエコシステムを確立させることが必要である。

#### B. サイバー空間とフィジカル空間の融合

通信システムや現実世界で動作するロボットなどのシステムはフィジカル空間で動作する一方で、デジタルツインやそれを連携させて駆使するためのビッグデータ処理や未来予測のための人工知能（AI）などのシステムはサイバー空間で動作する。両者が融合的に動作することが、Beyond 5Gのサービスには必須である。そのため、サブシステムがそ

れぞれの空間から持ち寄られ、それらが一体としてサービスを構成できる必要がある。

#### C. システムの全体最適化

サブシステムは、各事業者が運用管理しているので、これまでもサブシステムに閉じたりソース利用の最適化には、性能向上やコスト低減の観点から最大限の努力が行われている。しかし、Beyond 5Gのように複数の事業者からサブシステムが持ち寄られてサービスを構成する場合、個別のサブシステムに閉じた局所的な最適化だけでなく、サブシステムを横串にした全体最適化が必要になる。

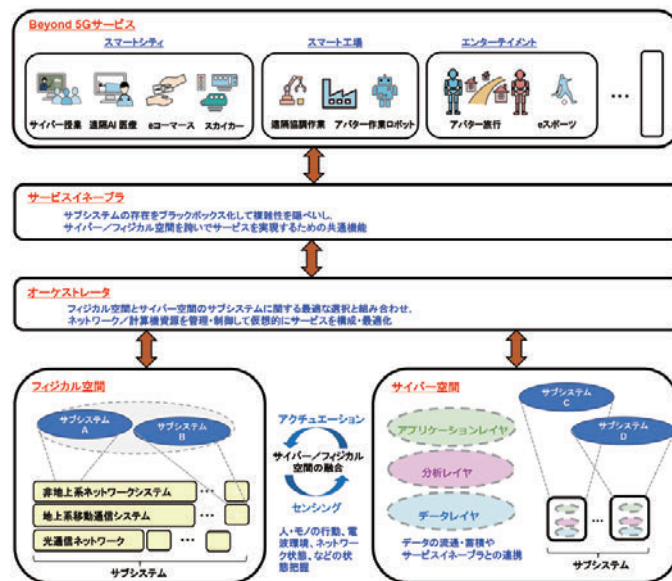
#### D. サブシステムのブラックボックス化

サービス利用者にとって、各サブシステムの複雑な機能を理解して扱うことは難しい。また、サービスプロバイダは、サブシステムを個別に扱うのではなく、多様な機能を駆使して利用者が求めるサービスの創成や開発に集中したい。そのため、サブシステムの複雑性が隠蔽され、ブラックボックスとして容易に扱えることを可能にする必要がある。

### 5.2 Beyond 5Gが目指すべきアーキテクチャ

アーキテクチャの要件に基づき、図3に示すBeyond 5Gが目指すべきアーキテクチャを設計した。Beyond 5Gサービスは、フィジカル空間とサイバー空間を構成するサブシステムの組合せにより実現される。サービスイネーブラはサービスが必要な共通機能を持ち、サービスからの要求をフィジカル空間やサイバー空間を構成するサブシステムのレベルに分解して、その選定や設定、組合せの実施をオーケストレータに要求する。オーケストレータは、サブシステムの機能や性能に関する要件を確認し、利用条件の確認や必要な手続きを行って、利用者のサービス環境を整える。

サービスイネーブラがサービス利用者の要求をいったん受け止めることにより、それ以降の複雑な構成を隠蔽して扱いやすくしている。そのため、サービスイネーブラからはAPIが提供されることが期待される。オーケストレータは、各サブシステムの利用条件に基づいて選択と設定を行うため、システム全体の観点での最適化が可能である。また、サブシステムとオーケストレータの間には共通のインタフェースが定義される。したがって、サブシステムは、このインタフェースに従って接続すればBeyond 5Gサービスを構成する要素として扱われるので、サービスに使われる組上にオープンに参入できる。

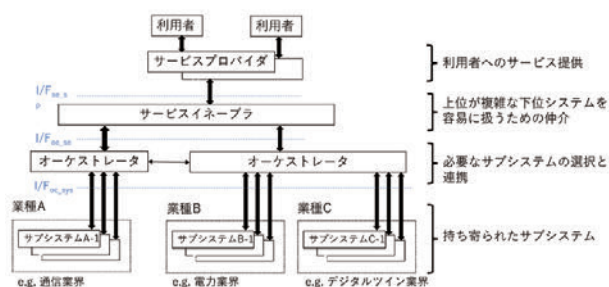


■ 図3. Beyond 5Gアーキテクチャ

なお、各事業者の内部で複雑なサブシステムを制御する機能があり、それをオーケストレータと呼ぶ場合もあるが、本稿でいうオーケストレータは事業者の外部にある機能であり、各事業者が持つ内側のオーケストレータと共通インタフェースで接続されることを想定している。

オーケストレータは、単一の機能として実現されるものではなく、分散型で実装されるべきものとする。図4では、業種Aが独自のオーケストレータを用意し、業種Bと業種Cは共用のオーケストレータを用意している環境を示している。それらのオーケストレータは相互に接続し、業種A～Cが一体として機能することになる。

このアーキテクチャで重要になるのは、オーケストレータとサービスイネーブラの機能と各インタフェースの定義であり、今後の議論が必要となる。また、このアーキテクチャに登場するサブシステムやオーケストレータまでもがエコシステムを構成することになり、業種をまたいだ責任分界点に関する議論も必要である。



■ 図4. オーケストレータの分散と連携

## 6. おわりに

Beyond 5Gに向けての研究開発は、日本だけでなく海外でも既に始まっている。従来のように通信業界に閉じた動きではなく、異業界を大きく巻き込み対話が活発化している。本稿で述べたシステムを持ち寄るという概念は、最近話題となっているWeb3のように社会プラットフォームの在り方を変える議論にも絡んで扱われることもある。Beyond 5Gに向けたこのような目まぐるしい動向を把握しながら、あるべき方向性を見定め、多くのステークホルダーが活躍できるBeyond 5Gの実現を目指したい。

### 参考文献

- [1] “Beyond 5G 推進戦略-6Gへのロードマップ-,” 総務省, 2020年6月30日.
- [2] 総務省, 平成30年版 情報通信白書.
- [3] Beyond 5G/6G White Paper 日本語2.0版, 情報通信研究機構, 2022年3月30日.
- [4] “Beyond 5G/6Gホワイトペーパー作成の裏話,” NICT NEWS, 2021 No.6 通巻490, 2021年11月.
- [5] 分身ロボットカフェ, オリイ研究所, <https://dawn2021.orylab.com/>
- [6] “THE ARTEMIS ACCORDS,” NASA, October 13, 2020.
- [7] 株式会社SkyDrive, <https://skydrive2020.com/>
- [8] YouTube NICTchannel, “Beyond 5G時代の未来生活とは? 3シナリオ統合版 (「Cybernetic Avatar Society」 「月面都市」 「時空を超えて」)”