

2021 年度
Beyond 5G 研究開発ワークショップ
取りまとめ

2022年3月

国立研究開発法人情報通信研究機構

はじめに

我が国は、少子・高齢化、地方過疎化、大規模災害の甚大化などに直面する課題先進国でもあり、また、それを克服する英知を持った技術先進国でもあります。とりわけ、モバイルサービスは、通信手段を超えて世界の情報・知的資産との入出力の接点でもあります。そのため、政治経済の両面で、重要なイニシアティブの獲得に向けた国際競争分野の一つになっており、次世代を担う Beyond 5G / 6G に関しても、各国で集中的な取組がはじまっています。

我が国においても、「Beyond 5G 推進戦略 -6G へのロードマップ-」（令和2年6月総務省）等を受け、国を挙げた取り組みが開始されました。

国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）では、令和2年度3次補正予算の措置と国立研究開発法人情報通信研究機構法の一部改正を受け、公募型研究開発のための基金が設置され、Beyond 5G 研究開発促進事業を開始し、これまでに6件の基幹課題をはじめ、総計で44件の委託研究開発事業を強力に推進してきています。

今般、NICTは、我が国に「強みがある技術」と我が国として「持つことが不可欠な技術」の研究開発力を重点的に強化し、Beyond 5G における将来の国際競争力を確保するため、今後取り組むべき研究開発に関するオープンな議論を行う場として、「Beyond 5G 研究開発ワークショップ」を開催しました。

開催にあたっては、多大なるご支援をいただいた総務省をはじめとする関係機関の方々、各セッションをコーディネートしていただいた砂田 薫様（国際大学 GLOCOM 主幹研究員／情報システム学会会長）、故中村 彰二郎様（アクセンチュア・イノベーションセンター福島センター共同統括 マネジング・ディレクター（当時））、鈴木 陽一様（東北文化学園大学教授/東北大学名誉教授）、梅比良 正弘様（南山大学理工学部・電子情報工学科教授／茨城大学名誉教授）及び渡辺 文夫様（Fifth Wave Initiative 代表）、多様なアイデアを発表・討論していただいた発表者の皆様及び聴講者の方々にこの場をお借りして改めて御礼申し上げます。

最後に、本ワークショップにおいて会津若松市でスマートシティの構築・運営の経験に基づく貴重なご助言を多々いただいた中村様が、3月9日に惜しまれつつ逝去されました。この場をお借りして、これまでのご功労に敬意を表しますとともに、心よりご冥福をお祈り申し上げます。

2022年3月

国立研究開発法人情報通信研究機構

Beyond 5G 研究開発促進事業プログラムディレクター

萩本 和男

2021年度 Beyond 5G 研究開発ワークショップ 取りまとめ

目次

1. Beyond 5G 研究開発ワークショップの開催について	1
1.1 開催の目的	1
1.2 開催の概要	1
2. 今後我が国が取り組むべき研究開発等の課題に関する検討	5
2.1 我が国をとりまく状況と取組の方向性	5
2.1.1 Beyond 5G 実現に向けた政府の取組	5
2.1.2 書誌データに基づく我が国の強み・弱みの概況	7
2.1.3 Beyond 5G 研究開発促進事業における取組状況	8
2.2 2030年代に期待される社会像の実現に向けた研究開発等の課題	8
2.2.1 低消費電力化・低環境負荷と高速・大容量通信の両立	9
2.2.2 我が国が強みを有する技術や産業の強化：デバイス、素材、光通信、高周波数帯、モビリティ（自動運転等）、ロボティクスなど	9
2.2.3 信頼性のあるAI、データを用いたサイバー・フィジカルの融合	12
2.2.4 サービスに応じた柔軟なネットワーク制御、無線リソース管理の最適化、電波と光の融合/センシングと通信の融合	12
2.2.5 非地上系（衛星、HAPS、ドローン、動物等）へのネットワークの拡張	12
2.2.6 ヒトの能力・認識行動などの拡張	13
2.2.7 スマートシティから Society5.0 へ	13
2.2.8 計測、EMC など標準化や製品化に必要な取組	14
2.2.9 Beyond 5G における総合的なセキュリティ確保	14
2.3 我が国の Beyond 5G を巡る研究開発エコシステムの強化発展方策等の検討	15
2.3.1 O-RAN などの国際的枠組や国際標準化、知財、オープン化をはじめとする市場創出活動	15
2.3.2 テストベッド構築や活用、ユースケース創出の仕掛け（Proof of Concept など）	16
2.3.3 各省庁が所管する規制や制度等との調整	17

1. Beyond 5G 研究開発ワークショップの開催について

1.1 開催の目的

国立研究開発法人情報通信研究機構（以下 NICT）は、2030 年代のあらゆる産業・社会活動の基盤となる次世代通信インフラ Beyond 5G の実現に必要な要素技術を確立するため、総務省の「Beyond 5G 研究開発促進事業研究開発方針」に基づき、Beyond 5G 研究開発促進事業を実施している。具体的には、Beyond 5G における将来の国際競争力を確保するため、我が国に「強みがある技術」と我が国として「持つことが不可欠な技術」の研究開発力を重点的に強化する必要がある、各国による本格的な開発競争が起こる前の「つぼみ」の基礎・基盤的な研究開発段階から、国費による集中的な支援を実施することとしている。

このため、Beyond 5G に関する最新の技術動向を把握した上で、Beyond 5G の実現に向けて重点的に取り組むべき技術課題について調査を行うことが必要となっている。

そこで、広く関係者からの情報や意見の集約を図り、Beyond 5G 研究開発促進事業の今後の取組における基礎情報として活用することを目指し、ワークショップを開催した。

1.2 開催の概要

幅広い研究者、関係団体や政府機関が参加するワークショップを通じて、関係者の意見集約を図り、我が国に「強みがある技術」と我が国として「持つことが不可欠な技術」の研究開発力を強化するために重点的に取り組むべき技術課題や、我が国の研究開発エコシステムの強化方策に関する検討を行った。開催の概要を示すと、次のようなものである。

開催日時:

- ・第1日 2022年2月3日(木) 9:00-17:00
- ・第2日 2022年2月17日(木) 9:00-12:00

実施方法:

- ・オンライン(Zoom ウェビナーにて開催)

開催プログラム:

■1日目(2月3日(木) 9:00-17:00)

1. 開会
2. 基調講演「Beyond 5G 実現に向けた政府の取組」(総務省国際戦略局長 田原康生)
3. 分野別セッション 第1部:2030年頃の革新的な社会像を具体化するための研究開発課題
4. 分野別セッション 第2部:Beyond 5Gを実現するための先駆的な研究開発課題
5. 閉会

■2日目(2月17日(木) 9:00-12:00)

1. 開会
2. 調査報告:「書誌データに基づく Beyond 5G 分野における我が国の強み・弱み分析」
3. パネルセッション
4. 閉会

■モデレータ／パネリスト

(第1日 総括 / 第2日 パネルディスカッション進行)

萩本 和男 情報通信研究機構 Beyond 5G 研究開発促進事業プログラムディレクター

(第1日 分野別セッション・モデレータ / 第2日 パネリスト)

砂田 薫 国際大学 GLOCOM 主幹研究員／情報システム学会会長

中村 彰二郎 アクセンチュア・イノベーションセンター福島
センター共同統括 マネジング・ディレクター

鈴木 陽一 東北文化学園大学教授/東北大学名誉教授

梅比良 正弘 南山大学理工学部・電子情報工学科教授／茨城大学名誉教授

渡辺 文夫 Fifth Wave Initiative 代表

(第2日 パネリスト)

寶迫 巖 情報通信研究機構 Beyond 5G 研究開発推進ユニット ユニット長

ワークショップはオンライン方式で開催し、約 400 名の参加を得た (表 1-1)。

表 1-1 ワークショップの参加者数

1 日目		参加者数
開会・基調講演・総括		406
セッション1 :誰もが活躍できる社会		149
セッション2 :持続的に成長する社会		181
セッション3 :安心して活動できる社会		74
セッション4 :超高速・大容量／超低遅延／超同時接続を実現する技術		175
セッション5 :自律性を実現する技術		96
セッション6 :拡張性を実現する技術		72
2 日目		参加者数
開会・調査報告・パネルディスカッション・総括		283

本ワークショップの開催に先立ち、NICT は、Beyond 5G を実現するための先駆的な研究開発課題について提案募集を行った (2021 年 10 月 29 日～11 月 26 日、56 件の応募)。

ワークショップ第 1 日は、NICT 徳田理事長による主催者挨拶の後、総務省田原国際戦略局長より Beyond 5G 推進に関する政府方針等 (グリーン・デジタル社会の実現、光通信技術の活用) を踏まえた Beyond 5G 実現に向けた政府の取組に関する基調講演がなされた。その後、応募のあった研究開発課題を中心に 6 つの分野別セッションにおいて、各モデレータの進行の下、2030 年頃に実現すべき社会像及び Beyond 5G を実現するための先駆的な技術の両面から我が国が取り組むべき研究開発課題について議論を実施し、NICT 萩本 Beyond 5G 研究開発促進事業プログラムディレクター (PD) による総括を行った (図 1-1、図 1-2、図 1-3)。

ワークショップ第 2 日は、書誌データに基づく Beyond 5G 分野における我が国の強み・弱み分析に関する調査報告も参照しながら、第 1 日の議論の結果を踏まえ、パネルディスカッションにて今後我が国が取り組むべき研究開発課題について、取り組むに当たって留意すべき視点等も含めた議論を深めた (図 1-1、図 1-4)。

■第1日(2月3日(木) 9:00-17:00)

- 主催者挨拶 (NICT理事長 徳田英幸)
- 基調講演「Beyond 5G実現に向けた政府の取組」(総務省国際戦略局長 田原康生)
- 分野別セッション 第1部: 2030年頃の革新的な社会像を具体化するための研究開発課題

セッション1: 誰もが活躍できる社会 (モデレータ) 砂田 薫 国際大学GLOCOM主幹研究員/情報システム学会 会長	セッション2: 持続的に成長する社会 (モデレータ) 中村 彰二郎 アクセントチュア・イノベーションセンター福島 センター共同統 括 マネジング・ディレクター	セッション3: 安心して活動できる社会 (モデレータ) 鈴木 陽一 東北文化学園大学教授/東北大学名誉教授
--	--	---

- 分野別セッション 第2部: Beyond 5Gを実現するための先駆的な研究開発課題

セッション4: 超高速・大容量/超低遅延/ 超同時接続を実現する技術 (モデレータ) 梅比良 正弘 南山大学理工学部・電子情報工学科教授/茨城大 学名誉教授	セッション5: 自律性を実現する技術 (モデレータ) 渡辺 文夫 Fifth Wave Initiative 代表	セッション6: 拡張性を実現する技術 (モデレータ) 渡辺 文夫 Fifth Wave Initiative 代表
--	---	---

- 総括 (NICT Beyond 5G研究開発促進事業プログラムディレクター 萩本 和男)

■第2日(2月17日(木) 9:00-12:00)

- 調査報告: 「書誌データに基づくBeyond 5G分野における我が国の強み・弱み分析」((公財) 未来工学研究所)
- パネルセッション
進行: NICT Beyond 5G研究開発促進事業プログラムディレクター 萩本 和男
パネリスト: 第1日各モデレータ5名、NICT Beyond5G研究開発推進ユニット長 寶迫 巖
- 総括 (NICT Beyond 5G研究開発促進事業プログラムディレクター 萩本 和男)

※ 第1日、第2日ともにオンライン開催

図 1-1 ワークショッププログラム



図 1-2 主催者挨拶、基調講演及び各セッションのモデレータ等

ワークショップ（1日目）において横断的に着目されたキーワード

【我が国をとりまく状況】

● インクルーシブ、持続性、安心安全などの社会・ユーザーの視点

- 人口集中、少子・高齢化、エネルギー・食料などの資源、性別・年齢・言語などの制約など、我が国が抱える数多くの社会課題

【強み・弱み・取り組むべき分野】

● 低消費電力化・低環境負荷と高速・大容量通信の両立

● デバイス、素材、光通信、高周波数帯、モビリティ（自動運転等）、ロボティクスなどの我が国の強み（技術・産業）

● 信頼性のあるAI、データを用いたサイバー・フィジカルの融合

● サービスに応じた柔軟なネットワーク制御、無線リソース管理の最適化、電波と光の融合/センシングと通信の融合

● 非地上系（衛星、HAPS、ドローン、動物等）へのネットワークの拡張、

ヒトの能力・認識行動などの拡張、スマートシティからSociety5.0へ

● 計測、EMCなど標準化や製品化に必要な不可欠な取組

【戦略等】

● O-RANなどの国際的枠組や国際標準化、知財、オープン化をはじめとする市場創出活動

● テストベッド構築や活用、ユースケース創出の仕掛け（PoC(Proof of Concept)など）

● 各省庁が所管する規制や制度等との調整

7

図 1-3 1日目の各セッションにおいて横断的に着目されたキーワード

- 「テクノロジー・ラディカル」に加え、「ユース・ラディカル」な取組への着目
- 「個別最適化」だけでなく「全体最適化」・「総合的なシステム構築・検証」の重要性
- 低消費電力と高速・大容量通信の両立
- AI・データ活用の活性化方策
- 人材育成

図 1-4 パネルディスカッションで取り上げられた主な論点例

2. 今後我が国が取り組むべき研究開発等の課題に関する検討

今後我が国が取り組むべき研究開発等の課題に関する検討を行うため、2022年2月3日及び2月17日に「Beyond 5G 研究開発ワークショップ」が開催された。本ワークショップにおいては、幅広い研究者、関係団体や政府機関が参加し、関係者の意見集約を図り、我が国に「強みがある技術」と我が国として「持つことが不可欠な技術」の研究開発力を強化するために重点的に取り組むべき技術課題や、我が国の研究開発エコシステムの強化方策に関する検討を行った。議論の概要を以下に示す。

2.1 我が国をとりまく状況と取組の方向性

2.1.1 Beyond 5G 実現に向けた政府の取組

移動通信システムは世代を重ねる中で、通信基盤から生活基盤へと進化している。Beyond 5G は、Society 5.0 を支えるフィジカル空間とサイバー空間の一体化の実現に必要な次世代の情報通信インフラであり、2030年代のあらゆる産業・社会生活の基盤になるとの想定のもと、政府は各種取組を進めている。

我が国の現況を見ると、現在の通信インフラ市場（基地局）は、中国、欧州及び韓国の企業が高いシェアを占め、関連特許も多数保有しており、今後も海外企業が高い国際競争力を維持・確保していくことが見込まれる。この中で、日本企業が移動通信分野で保有する標準必須特許の割合は減少傾向（3G：約3割→5G：約1割）にあり、国際競争力は低下傾向となっている。このままの状況が続けば、Beyond 5G でも海外企業の後塵を拝するおそれがある。このような中で、諸外国も、Beyond 5G（6G）への積極的な研究開発投資を検討・実施している。

他方で、我が国の通信トラヒックは増大傾向（これまで年率10%以上の増加）が続いており、また、コロナ禍による生活様式の変化のため、通信トラヒックは従前の推計を上回る増加となっている。これに伴い、ICT分野の消費電力も増加傾向にある（仮に技術革新が行われなかった場合、ICT分野における消費電力の大幅増加が懸念）。このような中で、我が国は、国際公約として2050年カーボンニュートラルの実現を宣言し、それを受けて、「経済財政運営と改革の基本方針2021 日本の未来を拓く4つの原動力～グリーン、デジタル、活力ある地方創り、少子化対策～（骨太の方針）」（令和3年6月18日閣議決定）、「成長戦略実行計画」（令和3年6月18日閣議決定）、「コロナ克服・新時代開拓のための経済対策」（令和3年11月19日閣議決定）や「緊急提言～未来を切り拓く「新しい資本主義」とその起動に向けて～」（令和3年11月8日新しい資本主義実現会議）といった政府方針でも、グリーン化・デジタル化の重要性や、2040年の情報通信産業のカーボンニュートラル達成等が位置付けられている。

そこで政府では、こういったBeyond 5G 推進に関する政府方針等（グリーン・デジタル社会の実現、光通信技術の活用）を踏まえ、無線通信技術、有線通信技術、共通基盤・アプリケーション等のBeyond 5G の実用に必要な技術の一体的な研究開発を引き続き推進することとしている。さらには、大阪・関西万博での5G・Beyond 5G ショーケースを実施することについても検討を進めている。

Beyond 5G 実現に向けた今後の技術戦略を検討するため、総務省では、令和3年9月に

「Beyond 5G に向けた情報通信技術戦略の在り方」について情報通信審議会に諮問した。情報通信技術分科会・技術戦略委員会で検討を進め、令和4年夏に答申予定としている。技術戦略委員会（令和4年1月13日）において、中間論点整理として、研究開発戦略の具体化に向けた方向性及び我が国が集中的に取り組むべき研究開発課題としてそれぞれ図2-1及び図2-2のとおり整理がされた。引き続き、技術戦略委員会において、引き続き、Beyond 5G 推進コンソーシアムや Beyond 5G 新経営戦略センターなど、産学官の活動や検討の状況を適切にインプットしながら、中間論点整理を踏まえた技術戦略の具体化・深掘りを行い、答申に向けた論点整理を進めていくこととされている。



図 2-1 研究開発戦略の具体化の方向性（中間論点整理）

出典：総務省資料

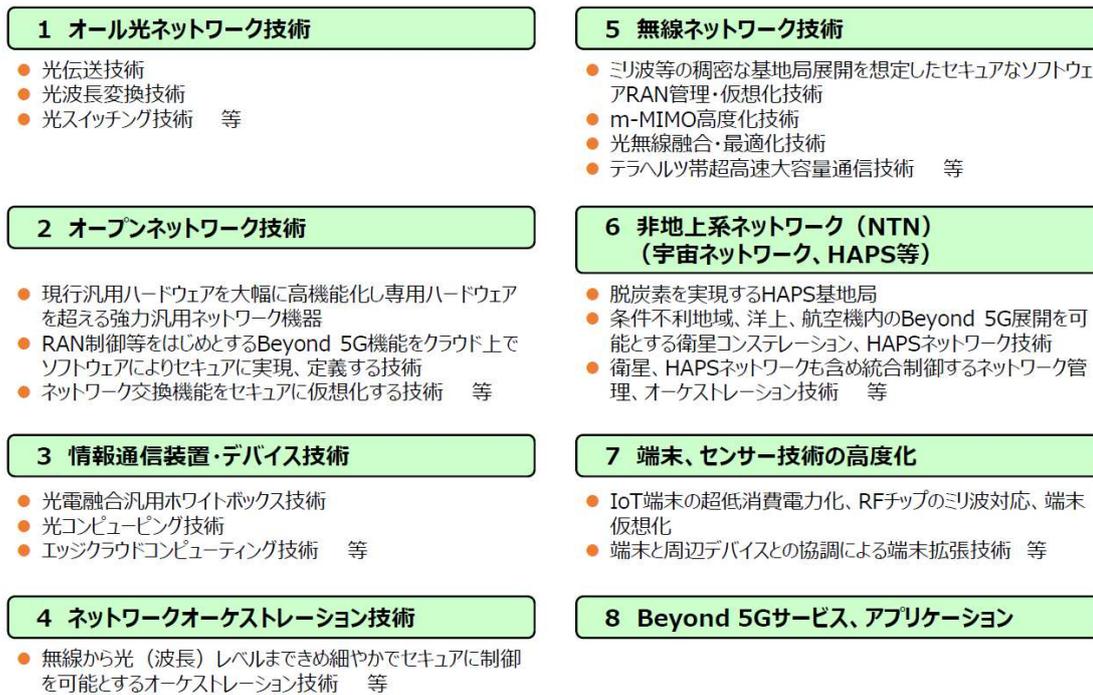


図 2-2 我が国が集中的に取り組むべき研究開発課題（中間論点整理）

出典：総務省資料

2.1.2 書誌データに基づく我が国の強み・弱みの概況

ワークショップ 2 日目では、Beyond 5G 分野に関する研究開発の初期段階において、我が国を含む各国の立ち位置や戦略等が論文発表等に顕在化してくることを念頭に、Beyond 5G 分野に関する日本を含めた各国の研究開発動向を分析するため、5G を含まない、Beyond 5G と 6G を検索語とする投稿論文および学会発表論文 3,280 件の書誌データと主要比較国の Web 情報の探索を実施した結果が報告された。

我が国の年別産出論文数は比較的上位にいるものの、各国の戦略に沿った取組の進展に伴い、相対的に低下してきている。一方で中国、米国が世界の中心として研究活動を展開し、フィンランド、スウェーデンなどの北欧各国も戦略的に取り組み、インド、韓国などのアジア諸国の取組も大きく進展してきているところである。

日本は国際連携活動に比して単独での取組が目立っており、高引用度論文数も少なくないなど国際的には特殊なポジショニングとなっている。

技術分野での特徴としては、各国で、Beyond 5G のコア技術、新規重要技術、応用基礎技術、応用領域の取組がそれぞれの戦略や特徴に応じて進展している。

日本は、次世代コア技術の基盤となる新規重要技術（応用物理、光学、材料など）においてトップランナーの状況である一方で、応用基礎技術（ネットワーク、サイバー等）と応用領域（IoT・ロボット、都市・環境・エネルギー、医療等）では、まだ参入者が多くない状況である。

また、一方では次世代キーデバイスの生産を担える日本企業が育っていない。覇権を狙う海外の主要企業は既にそれぞれ国際的に有利な地域に研究拠点を複数整備し、一部では生

産体制との連携も見える。

こうした日本の強み・弱みを踏まえ、戦略的な国際連携の視点を取り入れながら、国内外の体制整備と必要な研究開発に取り組んでいくことが重要である。

2.1.3 Beyond 5G 研究開発促進事業における取組状況

「Beyond 5G 推進戦略」（令和2年6月 総務省）で示されている「グローバル・ファースト」、「イノベーションを生むエコシステムの構築」及び「リソースの集中的投入」という3つの基本方針の下、NICTは「Beyond 5G 研究開発促進事業 研究開発方針」（令和3年1月 総務省）に基づき、Beyond 5G 研究開発促進事業を実施している。

本事業では、①Beyond 5G 機能実現型プログラム、②Beyond 5G 国際共同研究型プログラム、③Beyond 5G シーズ創出型プログラムの3つの研究開発プログラムが実施されている。これまでに別添に示す44件の委託研究開発課題が採択されている。

デバイスやヘテロNW構成については多くの研究開発が進展している一方で、サイバー・フィジカル制御プレーン、イネーブラー、プラットフォーム（PF）・サイバー・フィジカル・システム（CPS）制御、とりわけサイバー空間に関する研究開発の取組が少ない状況となっており、今後取り組むべき分野を検討するにあたっては、戦略的なポートフォリオの構築が求められると考えられる。

2.2 2030年代に期待される社会像の実現に向けた研究開発等の課題

Beyond 5Gには、サイバー空間を現実世界（フィジカル空間）と一体化させ（「サイバー・フィジカル・システム（CPS）」の実現）、「Society 5.0」のバックボーンとして中核的な機能を担うことが期待されている。すなわち、CPSを社会経済活動に最大限活用する「データ主導社会」への移行により、さまざまな社会的損失や、人口集中、少子・高齢化、エネルギー・食料などの資源問題の解決、性別・年齢・言語などによる制約の克服等、我が国が抱える数多くの社会課題の解決と経済成長とを両立できる「Society 5.0」の実現がいよいよ現実味を帯びたものとなってくる。

Beyond 5Gによって描かれるこうした社会は、まさに強靱で活力のある社会であり、「Beyond 5G 推進戦略」では、2030年に期待される具体的な社会像を端的に示すキーワードとして、「インクルーシブ」、「持続可能性」、「高信頼性」の3つが示されているが、これらの社会像の実現のためには、特にその実現を直接志向する「ユース・ラディカル」な取組と、先進的な技術の確立を目指した「テクノロジー・ラディカル」両面での取組を一体的に進めることが必要になる。

ここでは、このような観点から、我が国が持つ技術面、産業面での強み、弱みを踏まえながら、2030年頃実現すべき社会像とBeyond 5Gを実現するための先駆的な技術の両面から重点的に取り組むべき研究開発等の課題に係る議論を取りまとめた。

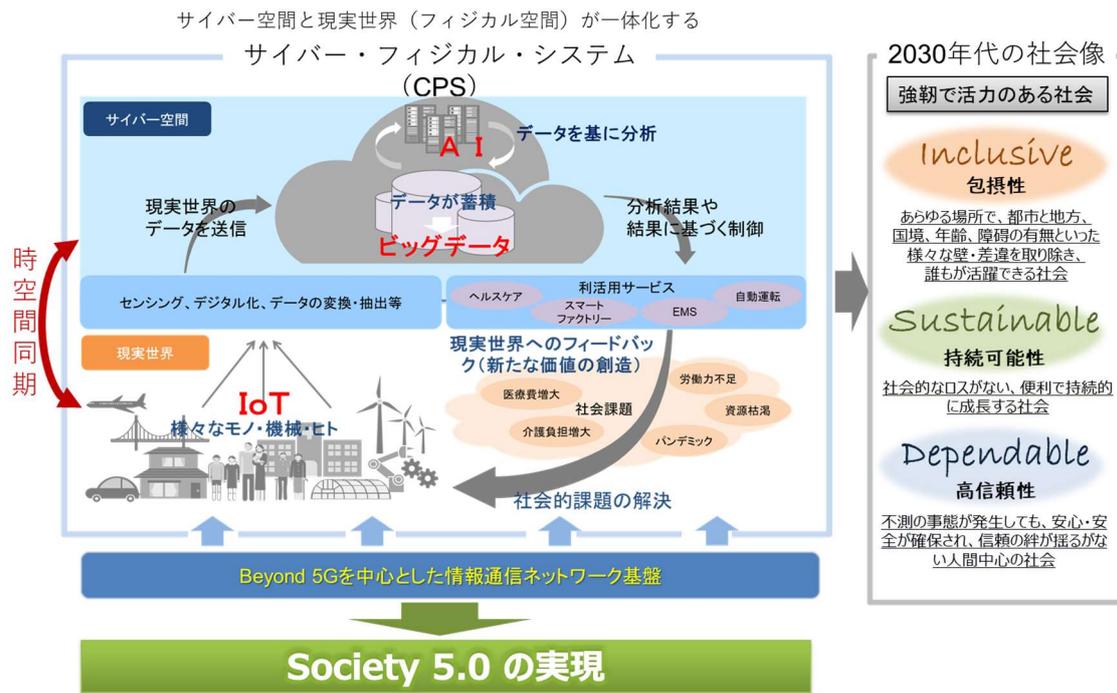


図 2-3 Beyond 5G への期待（2030 年代に期待される社会像）

出典:「Beyond 5G 推進戦略」

2.2.1 低消費電力化・低環境負荷と高速・大容量通信の両立

「Beyond 5G 推進戦略」では、超高速・超大容量通信を目指す一方、低消費電力化の技術開発がなされない場合、2030年のIT関連の電力消費量は2016年の36倍（現在の総電力消費量の1.5倍）となることが予測されており、こうした電力消費量の大幅な増加に余裕を持って対応するため、現在の1/100程度の消費電力に抑えることを検討する必要がある、としている。

ワークショップでは、こうした課題への対応として、均質性の高いカーボン材料（グラフェン）など低環境負荷の基礎素材開発や、グラフェン、ボロフェンといった低環境負荷物質による集積デバイス開発、パワーアンプの低消費電力化といった提案があった。また、Beyond 5Gを見据えたあるべき次世代通信環境として、ネットワークから端末、デバイスまで全てにフォトニクスベースの技術を導入し、超高速・大容量、超低遅延の通信を実現しつつ、現在のエレクトロニクスベースの技術のネットワークでは困難な大幅な消費電力の削減を実現するオールフォトニクスネットワークに関する取組や、サイバー空間を介した光と無線の融合などについての提案もあった。

このように、我が国発の世界最先端技術の強みを活かしつつ、低消費電力化・低環境負荷と高速・大容量通信の両立に向けた研究開発課題に取り組むことの重要性は、ワークショップにおいて分野横断的な議論の中でも焦点が強く当てられた。

2.2.2 我が国が強みを有する技術や産業の強化：デバイス、素材、光通信、高周波数帯、モビリティ（自動運転等）、ロボティクスなど

「Beyond 5G 推進戦略」では、「Beyond 5G のインフラを構成するハードウェアおよび

ソフトウェアの世界市場において、我が国の企業が強みを活かしてパートナー企業とともに市場シェアの3割程度を獲得すること」に加え、「機器を構成するデバイスの分野、Beyond 5Gをプラットフォームとして利活用する様々なソリューションの分野においても、我が国の企業が強みを活かしてパートナー企業とともに一定のプレゼンスを持続的に確保することを目指す」ことが、基本方針に示されている。

以下では、我が国が強みを有する技術や作業の更なる強化といった観点から、推進すべきと考えられる研究開発等の課題を整理する。

(1) デバイス・素材

デバイス・素材に関しては、均質性の高いカーボン材料の基礎素材開発や、低環境負荷物質による集積デバイス開発といった前述の提案に加え、デバイス系では、超高速・大容量化への寄与が期待されるテラヘルツ波帯デバイス技術に関連するものが、素材系では、超高周波パワー半導体デバイス技術に関するものなどがあつた。

特に、テラヘルツ波帯デバイス技術については競争力を獲得できる期待が高いことから提案も多く、その内容も、多様な周波数帯の分離に利用可能なテラヘルツ波帯単方向・双方向フィルタといったものから、移動体間等での高速・大容量通信の品質改善に資するテラヘルツ帯位相雑音キャンセル機能付きトランシーバの開発といったものに至るまで、多様性に富んだものとなっている。

(2) 光通信技術

光通信技術に関しては、2.2.1に述べたオールフォトニクスネットワークに加え、光伝送システム、高効率ネットワーク機能の仮想化技術等を柱とした提案があつた。

具体的な例として、モバイル技術の進化とサービスの進展に対応するネットワークインフラとして、光伝送システムの高度化・大容量化が重要という観点から、基地局の小型化・低電力化を実現するための光電気MCM (Multi-Chip Module) 実装技術、通信需要の増大に対応する帯域拡張波長多重システム技術等が示された。

高速・大容量化とともに、ネットワークの負荷分散、低消費電力化といった今後の社会的課題・要請への対応が重要であり、持続可能な社会を支えていく基盤になるという視点からの両立が求められている。

(3) 高周波数帯

ミリ波帯、将来技術のテラヘルツ波帯といった高周波数帯に関する技術は、今回最も多くの関連提案があつた分野の1つである。

例えば、回折損失の抑制に寄与する高指向性ビームによるリンク形成技術や、テラヘルツ波帯による長距離通信を雨天でも可能とする広帯域100GHz帯サービスリンク無線システムの開発、多数の基地局・アンテナをつなぐネットワーク形成に寄与する屋外で動作可能な広帯域300GHz帯固定無線システムの開発といったものから、周波数利用効率の改善や1GB当たりのコスト低下等に寄与するCell Free Massive MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output)、高周波数帯におけるカバレッジ改善を目指したmmWave (ミリ波) Massive Relay MIMO、移動環境下におけるミリ波帯高速ビーム制御、指向性ビーム結合型

高効率無線通信端末技術に関する具体的な提案があった。また、ワイヤレス電力伝送と無線通信との周波数共用など、複数目的に利用可能とすることで周波数有効利用を図る取組も重要となることから、これらに関連した提案も見られた。

日本は従来、こうしたミリ波帯やテラヘルツ波帯の無線通信技術の研究開発に積極的に取り組んできているものの、現時点ではビジネス面で成功しているとは言い難いという指摘がある。ミリ波帯やテラヘルツ波帯の高周波数帯技術の競争力を維持・強化するための最先端の取組が望まれるが、これら高周波数帯の本格的な利用はこれからであり、ユース・ラディカルな取組を進めるなどビジネス面での利用促進を図ることを念頭に置くことが必要になってくる考えが示された。

(4) モビリティ（自動運転等）

自動運転等のモビリティに関する提案として、EVによるマイクロモビリティの活用を軸にした人・モノのシームレスな移動やマイクロ-マクロ間移行をカーボンニュートラルに実現する統合型 Shared Micro Mobility のためのフレキシブルな Beyond 5G ネットワーク技術の提案や、高度な自動運転に必要な V2X (Vehicle to Everything) 技術といった提案に加え、自動運転や交通制御の高度化に資する周波数共用技術・高度運用調整技術・周波数の効率利用技術に関する研究開発の提案があった。

日本は従来、車づくりをはじめとするモビリティ分野においては、高い国際競争力を有しており、自動運転の導入・普及時期を意識した上で、通信技術開発やマイグレーションの検討を行うなど、これら事業会社等と Beyond 5G の取組との連携・協業を発展させていくといった戦略的な取組の必要性が、今後より高まってくるものと考えられる。また、こうした取組の成果が実現していくよう、制度面などの環境整備も欠かせないとの指摘があった。

(5) ロボティクス

ロボティクス関係としては、人や物が動いても途切れない 300GHz 帯無線リンク、大容量無線伝送で空間知覚や運動学習など身体領域の拡張をテラヘルツ波帯無線伝送で実現するという提案や、ミリ波帯を含む利用が進んでいない周波数帯の利用を促進する微小アンテナによる指向性ビーム結合型無線システムによって、認知機能や意識低下状態を検知する生体センサとつなぎ、様々な場面で人のセキュリティ支援を実現するという提案があった。

さらに、モバイル IoT 機器の増加に伴い課題となるノイズ抑制等の問題を解決する近接 EMC (Electromagnetic Compatibility : 電磁両立性) 高度化技術の開発によって、ドローンや自動車など自律型移動体の無線システム利用を促進し、スマートモビリティの普及を実現するという提案があった。

いずれも人の機能・活動の拡張を実現するというロボティクスの本質的な意味に関わる技術シーズからの提案であり、我が国が強みを有するといわれるロボティクス分野を支えていく取組になると期待される。このための制度面などの環境整備について、モビリティに関する議論と同様に指摘があった。

2.2.3 信頼性のある AI、データを用いたサイバー・フィジカルの融合

全体を通じて、AI の利活用に言及した提案が非常に多くみられた。そのうち、特に、「自律性を実現する技術」に関連して、いずれの提案においても、ネットワークの自律性を確保するにあたって、AI を利活用していくことは共通した前提として捉えられていた。また、それに加え、AI やデータの信頼性をいかに確保していくかが、大きな焦点の 1 つとなった。

一方、アルゴリズムが不適切なもの、意図的に偏向した学習をさせた AI など、信頼性だけでなく安全性や正当性などの AI に関する課題は多岐にわたり、それらの評価は極めて難しい課題であるという指摘もある。

また、スマートフォンだけではなく、ドローンや自動走行機器も接続対象となるサイバー・フィジカル融合社会では、デジタルインフラ提供とデジタル産業をつなげるインタフェース (API) 整備やサービスプラットフォームが求められる。インフラの経済安全保障という観点からも、これらの基盤整備は、今後ますます重要性が高まると推測される。それに資するものとして、2.2.1 に述べたオールフォトニクスネットワークの構築と高効率ネットワーク機能仮想化技術を組み合わせた提案もあった。国境を越えたデータの利活用促進については、ビッグデータのテーブルのフォーマットの一つである D5A フォーマットとルータを用いた個人データの活用が提案された。また、巨大プラットフォームへのデータ集中によるデータ共有の困難性という弊害が生じているとの問題意識のもとに、フローティングサイバースペース基盤を整備することを通じて「データの地産地消」を促進することの提案があった。

2.2.4 サービスに応じた柔軟なネットワーク制御、無線リソース管理の最適化、電波と光の融合/センシングと通信の融合

個別サービスに応じてネットワークを最適化するため、コア技術となる無線制御等のソフトウェア化やネットワークのスライシング等の制御技術に加え、ユーザ体感品質や問題発生時の原因分析等を行う技術、トラフィック需要に応じたリソースの最適化に資する帯域拡張波長多重システム技術、デジタルツイン生成の根幹となる高精度基地局間時刻同期技術、災害時にもサービスを継続可能とする地域 ICT 基盤技術、ワイヤレス給電、通信との融合などアンライセンスバンドの利活用に係る技術など、多様な提案があった。

このような、ネットワークの自律性・拡張性の確保や電力消費の最適化を実現することができるネットワークサービス基盤技術の実現は、実際に Beyond 5G が社会インフラとしてあらゆる場面で利用されていくうえで必要不可欠なものであり、競争力をなす重要な基盤となることが考えられ、諸外国のベンダー等における取組が活発に展開されている分野の一つとなっている。

2.2.5 非地上系（衛星、HAPS、ドローン、動物等）へのネットワークの拡張

拡張性について、仕掛けの拡張性という一つの論点がクローズアップされた。例として、基地局などのテレストリアル（地上系）に対して、対地静止軌道衛星 (GEO(Geostationary orbit))、低軌道周回衛星 (LEO(Low Earth orbit))、成層圏通信プラットフォーム向け無人航空機である HAPS (High Altitude Platform Station)、ドローンなどのノンテレストリアル（非地上系）、さらには鳥や動物など、様々なレイヤーがあり、それらをどのように組み

合わせ、つなげてネットワークを拡張していくか、という点が課題とされた。

この観点から、GEO・LEO・HAPSを含めた多層ネットワークによる災害時にも途切れない通信システムや、これらと連携・統合した基地局等の多角的研究といった提案があった。他、ドローンの利活用、高度運用で必要になるとされる周波数共用技術・高度運用調整技術・周波数の効率利用技術等に関する研究開発や、障壁になるという野生鳥類との共生を実現するためのリモートセンシングやロボット連携による学習・行動制御等のインタラクション基盤技術の開発といった提案があった。

また、これらの普及・社会実装を推し進めていく上で、省庁横断的な制度運用や国として国際標準獲得や必要な人材育成を戦略的に取り組んでいくことの重要性が指摘された。

2.2.6 ヒトの能力・認識行動などの拡張

高齢化に伴う心身の衰えや障がい・疾病等による社会参画の機会の喪失、それらに付随する生活の質（QOL(Quality of Life)）の低下など、インクルーシブな社会を実現する上での課題に対するソリューションとして、Beyond 5Gの超低遅延ネットワークを活用して無意識的に情報を与えることで、適切な行動変容を促すHuman-in-the-Loop型ネットワークシステムの開発や、高齢者のデジタル活用を促進するための感情対話型システムの開発、といった提案があった。これらはいずれも脳科学研究等の関連分野との連携が必要となるものである。

また、空間や言語、世代などによるコミュニケーションの分断を乗り越えるために、XRやメタバース、量子コンピューティング・量子暗号といった技術開発の重要性についても指摘された。

人の認識行動の支援・拡張に資するウェアラブルデバイスとの通信を行う際に課題となっている回折損失を抑制するための技術開発として、「デバイス・素材」の項でも言及した高指向性ビームによるリンク形成を行う技術の提案があった。

2.2.7 スマートシティから Society5.0 へ

今回 Society5.0 の実現に近づく方向性の提案として、あらゆるモノ・コト・場所をセンシングする技術や大容量・低遅延通信技術、通信と建築の相互デザインシナリオに関する提案、港湾等の社会基盤施設への情報通信技術適用に向けた社会実装のための実証研究、AI活用等により実現するサイバー空間とフィジカル空間の統合利用によって社会課題を解決し、さらにそれを実現するサービスが自然に拡大、自律的に成長するような仕組みの構築、といったものが示された。

これに対してパネルディスカッションにおいて、都市 OS（データ連携基盤）を企業と地域が連携して標準化した取組事例が紹介され、通信分野でも様々なネットワーク、テクノロジーを組み合わせ、レイヤーごとにサービスカットしていくことで標準化が進み、個別に集中投資すべき競争領域が明確化されるという効果及びビジネスモデルを企業と地域が連携して作っていくことで、課題が見えるようになり、スピードが上がり、コネクティッドの方法論も見えてくるとの示唆があり、サイバー・フィジカルが融合したシステム、社会の実現に有効な手段になるといった議論があった。また、現在取り組まれている研究課題や、今回提案のあった課題などについて、個々の技術は独創的で、高い技術レベルにある素晴らし

いものである一方で、個別バラバラに推進することでは、十分な成果を挙げられないのではないかと指摘があった。スマートシティなどのように、多様なプレーヤーが実際に課題解決に向けた取組を展開しているような場において、これら技術を総合的なシステムとして実装し、運用することの必要性が着目された。

さらに、これらの取組が一つ一つの都市（スマートシティ）だけでなく、社会全体へと普及していくことで、Society 5.0 へと発展していくことが期待される点について指摘された。

2.2.8 計測、EMC など標準化や製品化に必要不可欠な取組

標準化や製品化に必要不可欠な取組として、1THz 以上のテラヘルツ帯域信号の電場可視化技術などテラヘルツデバイスの性能評価に技術開発の提案や、拡張性の確保にも直結するモバイル IoT 機器の近接 EMC の高度化といった提案があった。

前者は、数 100 GHz の低テラヘルツ帯で動作する様々なデバイスやそれらを用いた回路等の性能を評価する手段が限定的であったり、空間的な信号の伝搬状態のきめ細かい把握が困難といった技術的な問題に対応しようとするものであり、後者は、モバイル IoT 機器における不要電波の発生と無線通信デバイスの干渉といった問題の解消を目指したものであった。

デバイス等の研究開発にあたっては、このような計測や EMC などにより適切に評価する仕組みが両輪となって標準化や製品化が推進されていくことが示された。

2.2.9 Beyond 5G における総合的なセキュリティ確保

Beyond 5G 時代の安全安心な社会を実現するには、サイバー空間の情報セキュリティの確保に加え、構成するソフトウェア・ハードウェアを含めて総合的なセキュリティを確保することが不可欠である。しかし、ソフトウェアとハードウェアのセキュリティ領域の間には多様なミッシング・リンクが存在しているのが現状であることや、ハードウェアに関するセキュリティを検討するに際しても数多くの課題があるとの指摘があった。

それらの課題に対して、AI を活用した自律的なセキュリティ診断などのソフトウェア技術の高度化や、セキュリティ性の高い Beyond 5G 用チップなど、IoT システムのサプライチェーン全体のセキュリティ確保に必要となる技術の開発に関する提案があった。安全安心な社会を実現するためには、AI を徹底活用することで、ソフトウェア、ハードウェア双方のセキュリティに関するあらゆる技術のデータベース化・共有等が重要であり、そのレポジトリ化・公開・利用のあり方や標準化、分野横断で安全にデータを連携するための環境の構築などについて検討することの提案があった。また、公共空間・社会コミュニティ全体のセキュリティの実現に向けた技術開発及び社会実装を促進するため、エンドユーザ、サービス提供者、SIer、装置メーカー、方式を研究開発する研究機関・大学のすべてが参加し、標準化・情報共有ができる体制をつくる必要性について指摘があった。さらに、これらの取組は世界を見ても問題意識が限定的に留まっていることから、日本が主導して取り組む意義が高いとの指摘があった。

2.3 我が国の Beyond 5G を巡る研究開発エコシステムの強化発展方策等の検討

ここでは、書誌データ分析やワークショップでの検討を踏まえ、上記課題等に取り組む際に持つべき戦略的な視点や我が国の研究開発エコシステムの強化発展方策のあり方について、検討結果をとりまとめた。

2.3.1 O-RAN などの国際的枠組や国際標準化、知財、オープン化をはじめとする市場創出活動

(1) オープン化、知財、標準化

Beyond 5G で実現するインクルーシブな環境を支える基盤となるデータの利活用について、日本が主導して分散的・グローバルに共有し促進していくといった提案をはじめ、O-RAN(Open Radio Access Network) ALLIANCE などの国際的枠組を通じて、オープン化や標準化に取り組むことの重要性が議論された。なかでも標準化については、地域社会全体で情報共有のため標準化に取り組んだ事例を基に、個別に集中投資すべき競争領域が明確になる、課題が見え克服のスピードが上がる、コネクティッドの方法論も見えてくる、といった効果を挙げてその必要性が示された。

また、オープン化や知財、標準化を戦略的に進めていくに当たって、海外を巻き込んだ連携や情報発信の重要性とともに、国内で横連携が少なく標準化が遅れてきたとの指摘があり、技術開発、研究開発の成果をより広く伝えていくため、外部との成果の共有をしやすいとともに、ネットワークの基盤を作る人とアプリを作る人を例に、分野を超えて協働していく環境を作ることや、連携において人々の認識を変えるという視覚的デザインの重要性についても指摘があった。

(2) データ共有の重要性と企業の意識改革

日本で一番データを持っていて、そのデータを使いたい企業が来るという会津若松の例を挙げ、データを個々の企業などで集めることの限界や、地域にあるデータが全部つながって初めて地域経営及び日本社会の課題解決につながるという認識が示された。その上で、データが共有され、二次利用が可能になることで得られるメリットを踏まえて、ビジネスモデルやその前提となる企業の意識改革を進めていくことが重要であるとの指摘があった。

また、こういったデータ活用に当たって、制度やルールによって、インセンティブ、ペナルティを作っていくことが必要との意見や、データが誰のものかといった国際的な合意形成に日本がリーダーシップをとっていくことを期待する意見も示された。

さらに、スマートシティの例のみならず、様々なルーツに根差す様々なレイヤーの多様なデータが掛け算的にインテグレートされるところに新しい価値が生じ、価値創造の源泉であるとして、インテグレートのための様式や API の標準化、ルールや権利の整備等々が、情報データの巨人に対して集合の力をもって戦う時のキーになるという指摘もあった。

(3) 国家プロジェクト等を通じた企業間の横連携促進

日本はインテグレーションが弱いと言われるが、水平統合が苦手な結果的に製品市場を

とることができていないとの指摘がある。例えば、国の研究開発プロジェクト（国家プロジェクト）を通じた協力関係が構築され、最終的に製品あるいはサービスの実現につながるような取組へとつながることへの期待が示された。

また、国家プロジェクトにおいてだけでなく、サプライチェーン全体で情報が共有されることがウイン・ウインな関係の構築へつながり得ることの理解を醸成するスキームを作る必要があり、そこが横連携のポイントになるのではないかと指摘があった。

(4) グローバル・ファーストの観点からの連携の仕掛け・仕組み

「Beyond 5G 推進戦略」の基本方針の一つであるグローバル・ファーストの観点、日本企業のためにもグローバルな視点からの連携が必要であるとの指摘や、それらに対応した公募研究の仕組みが重要であるとの指摘があった。

また、グローバルにリーダーシップを取っていくための仕掛けの例として、人を集めて議論できる場をつくったり、白書作成などをリードして広く意見を求め、集約していく活動が紹介されるとともに、様々な機会を通じて特に海外のコミュニティを巻き込んだ議論の場をつくることや、海外への発信・問いかけが大切であるとの指摘があった。

2.3.2 テストベッド構築や活用、ユースケース創出の仕掛け（Proof of Concept など）

(1) ユース・ラディカルという視点の重要性

情報通信は蒸気機関と同様、長期にわたって経済社会に大きな変容をもたらす汎用技術（General Purpose Technology）である。蒸気機関を利用した鉄道の整備で人びとの生活経済活動が大きく変わったように、このような汎用技術では、画期的な技術革新、すなわちテクノロジー・ラディカルな視点だけでなく、画期的な利用方法を生み出すユース・ラディカルな視点からのアプローチが重要になるとの指摘があった。

例えば、GAFAは、一見テクノロジー・ラディカルな企業と思われがちであるが、情報を検索する、本を購入する、友人と交流する、音楽をダウンロードする、といったインターネットの新しい利用方法を社会に浸透させることで急成長を果たしたユース・ラディカルな企業であると位置づけられている。日本の強い技術を伸ばし、それをさらに競争力に結びつけるために、ユース・ラディカルな視点を重視していくことが必要との考えが示された。

(2) 新たなユースケースを生み出すテストベッドの重要性

ドイツでは、病院、港湾、交通、工場という四つのユースケースを試すデータシミュレーションを行えるようなテストフィールドが、米国では6Gに関する大規模なテストベッドがあると言われている。日本のテストベッドについても、それらと相互に連携が可能となり、また、それぞれがハブになるような仕組み作りができれば、新たに多様なユースケースが生まれてくるのではないかと指摘があった。

また、外国の機関や研究者等に使うことで日本が得られるメリットが大きくなるよう、必要に応じて制度を変えていくことを検討してはどうかとの議論があった。

さらに、個人情報の管理やデータの扱い方に関するルール作りなどについては、予め全て

を決めることができるものではなく、実際の利用シーンでオペレーションを回してみながら現実的なルール作りを考えていくことも大事だという意見が示された。

2.3.3 各省庁が所管する規制や制度等との調整

(1) 人材育成プラットフォームの構築、国としての戦略

良いものを作れば売れるといった時代ではなくなっている中で、Beyond 5G の技術を担当する人材については、無線の技術者、アプリの開発者、ビジネスの人など、皆が考え方を共有することが大切であり、新たな時代を支える人材を育成するプラットフォームについての提案があった。

さらに、人材、組織や社会の多様化に関する論点においても人材育成は不可避の論点であり、国をあげた戦略を持って取り組んでいくべきとの議論があった。

(2) 分野を超えたコミュニケーションの場の必要性

各セッションの意見交換において、新たな連携の可能性に関する気づきを得たとの発表者がいたなど、分野の垣根を超えた研究者・技術者同士の議論の場や連携の必要性が指摘された。

(3) Beyond 5G の特性に応じた法制度への期待

テラヘルツ波帯などの超高周波数帯が利用される Beyond 5G の普及促進を加速化させる観点から、免許不要帯域を拡充することが効果的ではないかとの指摘があった。また、山あいと街中などの長い距離の伝送ができる IoT にも Beyond 5G の利用を拡げることのメリットが提起された。さらに、200mW までの免許不要により普及した Wi-Fi の成功例を挙げ、Beyond 5G でユース・ラディカルのもを生み出していく一つの原動力になると期待されているとの意見があった。

また、Beyond 5G はこれまでの通信技術よりも更に医療、教育、防災、交通などの広範な分野で利用される社会全体の中核的なインフラとなることが期待されている。このため、研究開発を進めていく上では、電波や電気通信事業に限らず、多様な省庁等との間で規制や法制度の在り方に関する調整や議論が必要になるとの考えが示された。

さらに、ユース・ラディカルな観点からの研究開発は、既存の制度的枠組みや制約の下では難しいことがある。他方、テクノロジー・ラディカルな研究開発の一つの出口が新しい制度であるという、制度変革に対するプロアクティブな立ち位置が日本では不足しがちであるとの指摘があった。

研究開発関係者の意識変革を促すとともに、Beyond 5G の特性やユースケースに応じて必要となる新たな法制度等についても、それぞれを所管する省庁等において柔軟に検討されていくことに対する期待が示された。