

戦略プロポーザル

無線・光融合基盤技術の 研究開発

～次世代通信技術の高度化に向けて～

STRATEGIC PROPOSAL

Basic technologies for wireless and optical convergence
toward advancing next-generation communication

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください

<https://www.jst.go.jp/crds/>

エグゼクティブサマリー

「無線・光融合基盤技術の研究開発 ～次世代通信技術の高度化に向けて～」とは、フィジカル空間とサイバー空間をつなぐ高性能・高機能な次世代の通信技術に向け、これまでの無線と光、エレクトロニクスとフォトリソの知見や技術をうまく活用して新たな基盤技術（無線・光融合基盤技術）を創出するための研究開発戦略である。未踏の周波数領域であった無線と光の境界の周波数領域（テラヘルツ（THz）帯）に焦点を当て、その高度利用に向けて、光技術、異種材料集積技術、メタマテリアルなど日本の強い科学技術をコアにした無線・光融合基盤技術の創出や、コンピュータネットワーク、レーダー、センサなどへの応用も考慮した通信デバイス・モジュールの低消費電力化、高信頼化、低価格化などの研究開発の推進を提案する。また、このような研究開発を進めるために、高周波計測装置などの共用施設の整備、無線・光融合研究を加速するファンディング、無線・光融合を基軸とした新たなコミュニティの形成、既存のプロジェクトや国際標準化活動との連携など、研究開発体制の強化策についても提案する。

近年、フィジカル空間とサイバー空間を融合させた高度なデジタル社会の実現に向け、高速・大容量・低遅延・多数同時接続・低消費電力・セキュアな次世代の通信技術が期待されている。これまでの通話やメール、SNS、写真・動画送受信、テレビ電話などの個人利用だけでなく、工場、農業、サービスなどの産業面での利用、遠隔医療や災害時の接続確保など社会インフラ・基盤としての役割も重要になっている。特に、IoTを活用した様々なサービスの提供が期待される分散コンピューティングやマルチアクセスエッジコンピューティングでは、応用先やサービスに応じた様々な形態のネットワークの構築が期待される。また、クラウドとエッジの携帯端末とをつなぐ移動無線通信は5Gのように高速・大容量化が進み能力的に光通信との差が小さくなっており、無線通信技術と光通信技術のそれぞれの特長・利点を活かしたネットワーク構築に向けた技術開発やシステム設計が重要になっている。このため、基地局のオープン化の流れとともに様々な技術レイヤー、ステークホルダーを巻き込んでBeyond 5G/6Gに向けた研究開発が世界的に活発になってきている。

一方、これまで無線通信の高速化・大容量化は数百MHz～数GHzの周波数領域を用いて、限られた周波数帯域の中で主に通信方式の高度化や多重化により高速・大容量化が行われてきた。しかし、Beyond 5G/6Gやその先（7G）を見据えた場合、さらなる周波数利用効率の向上に向けた技術の創出とともに、広い周波数帯域の確保の点から数十GHzの周波数領域（ミリ波帯）からさらにその上のTHzの周波数領域（テラヘルツ帯）まで利用する技術開発が不可欠になると考えられる。テラヘルツ帯はこれまでの無線（マイクロ波帯）と光（可視光・赤外光）の間の周波数領域であるが、この領域は「テラヘルツギャップ」と呼ばれて、エレクトロニクス技術と光（フォトリソ）技術のいずれにとっても難しい領域であり、通信に利用するには高効率・低消費電力で発振・増幅・検出可能なデバイス・回路、空気による減衰の影響を低減する指向性アンテナなどハードウェアに関する様々な技術的課題がある。これらの課題解決のためには、これまでの無線通信と光通信、エレクトロニクスとフォトリソの知見や技術をうまく活用して新たな技術（無線・光融合基盤技術）を創出することが重要になる。ハードウェア研究は長い時間を要するため、これらの課題の克服に向けた新たな基盤技術の創出、および関連する基礎科学、材料科学には早期に取り組む必要がある。

世界中で2030年頃のBeyond 5G/6Gでの実用化を目指した次世代通信技術やエレクトロニクスデバイスとフォトリソデバイスを集積する光電融合技術などのプロジェクトが進行しているが、さらにその先の世代（7G）の長期的な研究開発を含む戦略・活動はまだ見えないことから、世界に先駆けて早期に通信に関するハードウェア基盤技術の長期的な研究開発の課題を明らかにし、研究開発を戦略的に推進すべきである。

今後取り組むべき研究開発課題としては、未踏の周波数領域の利用に向けた研究開発、無線通信と光通信の高度利用に向けた研究開発、低消費電力化・高信頼化・低価格化に向けた研究開発、技術進化を支える基礎科学・材料研究があり、それぞれについて以下に示す。

(1) 未踏の周波数領域の利用に向けた研究開発

無線通信の通信容量を大幅に増やすためには、これまで利用してきたマイクロ波や数十GHzのミリ波帯より上の周波数領域であるテラヘルツ帯（100GHzから1THz）の利用が望まれる。しかし、このような高い周波数領域になると、電波の回り込み減少、大気電波吸収増加、電波発生の発振効率の低下、信号増幅の困難化、導電体・誘電体の伝送損失の増大などの問題が顕在化し、電波を遠くまで飛ばすことが難しくなってくる。このため、目的の場所にだけ送信する指向性アンテナ技術、電波の反射・透過の積極的な利用、高効率のテラヘルツ波発振素子・検出素子・増幅回路、低伝送損失のための新たな基板材料・導電体構造・誘電体材料、高周波材料特性評価手法・評価装置などの研究開発が必要である。

(2) 無線通信と光通信の高度利用に向けた研究開発

限られた周波数帯域の中で、各種の多重化技術によりさらなる高速化・大容量化を実現する技術開発が必要である。また、今後の通信の機能として求められる自動車やIoTセンサなどの多数の端末に同時に接続する超多数同時接続技術や、リアルタイムの制御を可能にするための超低遅延で安定して情報を送受信する技術などにも取り組む。さらに、無線通信と光通信の特長を活かした多様なシステム構成を実現する上で、無線信号と光信号の相互変換やアナログ・デジタル変換を高速かつ効率的に行う技術にも取り組む。多様なシステムの構成にはソフトウェア技術の役割が大きくなるため、これらのハードウェア技術の研究開発はソフトウェアとの連携を考慮して行うことが重要である。

(3) 低消費電力化・高信頼化・低価格化に向けた研究開発

次世代通信の基盤技術としての機能要求は上記（1）（2）になるが、ネットワーク機器のCO₂削減や社会インフラとしての信頼性・強靱性といった社会的な要請に応え、さらにこの基盤技術を通信用システムだけでなく、データセンターやエッジコンピューティングなどのコンピュータネットワーク、レーダーシステム、IoTセンサなどの応用分野に利用するためには、低消費電力化・高信頼化・低価格化の研究開発も必要である。これには材料やデバイスレベルでの特性の追求だけでなく、デバイス・部品を集積化し機能モジュールとしての機能実証が求められており、光デバイス、先端CMOSデジタル回路、高周波アナログ回路、アンテナなどの異なる材料・デバイスを一体化するハイブリッド集積化およびモジュール化技術の研究開発を行う。

(4) 技術進化を支える基礎科学・材料研究

上記研究開発では、既存の科学・技術を最大限活かした技術開発で実現し得る項目に加え、既存技術の単純な延長では実現困難な目標も含まれる。また、今後一層高まる通信技術への要求に応じていくためには、技術の不連続な進化が必要となる。これには、関連する物性科学や光科学などを含む基礎研究、エマージング材料やプロセス技術に関する研究など、幅広く関連基礎分野の研究を推進することが極めて重要である。

上記の研究開発を効率的に進めていくために、長期的な視野に立ち、高度な高周波特性評価が可能な共用施設、デバイス・モジュールなどの試作が可能なデバイス作製の拠点とその拠点間の連携、機能検証可能な研究拠点などの整備とともに、長期的なファンディング、国際標準化を見据えた産学官連携・国際連携、無線・光融合を主軸とする異分野（無線通信、光通信、アナログ・デジタル回路、シリコン・化合物半導体デバイス、集積プロセス、材料、計測・評価など）が集まる新たな研究コミュニティの形成を提案する。特に、高周波特性の評価装置やデバイスの作製に関わる装置が高額であり、単独の大学での購入・保有が難しいため、誰でもが利用できる共用施設の整備と、デバイス・集積回路が試作・評価できる施設や仕組みの構築は必須である。また、Beyond 5G/6Gの次の世代（7G）の商用化が予想される2040年頃やさらに先を見据えた文部科学省・JSTによる長期の研究開発プロジェクト・ファンディングの実施と、総務省や経済産業省で行われているBeyond 5G/6Gのプロジェクトとの連携が望まれる。無線・光融合の新たなコミュニティの形成においては、電子情報通信学会や応用物理学会などでの通信と回路、素子、材料の融合領域を新設あるいは拡大し、そこでの関係者がアカデミアのシーズと産業界の将来ニーズのマッチングを図ることや、共通の目標・価値観を得る短期・長期のロードマップを作成することなどが期待される。

Executive Summary

The proposal, entitled “Basic technologies for wireless and optical convergence toward advancing next-generation communication”, discusses how to create and establish innovative basic technologies for next-generation high-performance communication allowing the smooth connection between physical and cyber space. The key approach toward the goal is to combine the existing concepts and technologies from the fields of wireless and optical communications, or electronics and photonics in other words, which have been so far developed without intensive interactions. The converging of the concepts and technologies will initiate the developments of novel science and technologies that will be crucial for next-generation communication. In the proposal, we focus on the terahertz (THz) region, the frequency range between the current communication bands in wireless and optical networks, which has not been well explored. For the advanced use of this unexplored frequency band of electromagnetic waves, we discuss some of the strategic research areas. One of the strategic areas is the development of core technologies converging wireless and optics, based on Japan's advanced science and technology, such as photonic technology, hybrid integration technology, and meta-materials. Developing technologies aimed at obtaining lower energy consumption with unique functional materials, higher reliability, and further cost reduction of devices and modules for communication, is another important direction we should aim for. Thereby, those devices and modules would be used not only in communication but also in a wide variety of applications such as computer networks, radars, and sensors. For promoting such strategic research, we propose measures to strengthen the R&D systems, including the development of shared facilities such as high-frequency measurement equipment, funding to accelerate wireless and optical fusion research, the formation of a new research community based on wireless and optical convergence, and coordination with existing projects and international standardization activities.

In the coming years, high data rate / large capacity, low latency, massive connection, low power consumption, and secure next-generation communication technologies are expected to contribute toward the realization of an advanced digital society in which physical and cyber spaces are highly integrated. Not only the conventional personal use such as telephone calls, emails, SNS, photo / video email, and video calls, but other use areas are also becoming important. For example, industrial use such as in factories, agriculture, and services, as well as the roles played in the social infrastructure, such as in telemedicine or communication in case of disaster. In particular, in distributed computing and multi-access edge computing, which are important to provide various services utilizing IoT, it is expected to build various forms of networks in accordance with applications and services. In addition, wireless communication that connects the cloud and edge mobile terminals involves increasingly higher data rate and larger capacity, as represented by 5G in recent years. As a result, the difference between wireless communication and optical communication in terms of communication capacity is becoming smaller. Therefore, there is a demand for technological development and system design for networks that makes the best use of the features and advantages of wireless communication and optical communication technology. For this reason, with the trend moving toward open base stations, the research and

development for “Beyond 5G / 6G” is accelerated worldwide, involving various technological layers and stakeholders.

On the other hand, up to now, the data rate and capacity of wireless communication have been increased in the frequency range of several hundred MHz to several GHz mainly by improving the radio access methods and by multiplexing in the limited frequency bandwidth. However, when looking at “Beyond 5G / 6G” and the subsequent generation (7G), it is necessary to develop technology that uses the frequency region of several tens of GHz (millimeter wave band) to the THz frequency region (terahertz band) from the standpoint of wider frequency utilization, in addition to technology for further improving frequency utilization efficiency. The terahertz band is the frequency region between radio (microwave band) and light (visible light / infrared light) so far. However, this region is called “terahertz gap,” and the development of practical devices is difficult for both electronics technology and optical (photonics) technology. For communication application, there are various technical issues related to hardware, such as devices / circuits that can oscillate, amplify, and detect with high efficiency and low power consumption, and array antennas that enable longer distance transmission. In order to solve these issues, it is important to create new technology (basic technologies for wireless and optical convergence) by making good use of the knowledge and technology of wireless communication and optical communication, as well as electronics and photonics. Since hardware research takes a long time to be achieved, it is necessary to initiate the creation of new basic technology to overcome these issues, and related basic science and materials science at an early stage.

Projects on basic technology of next-generation communication and photonics-electronics convergence technology that integrate electronic devices and photonic devices are ongoing, with the aim of putting them into practical use in “Beyond 5G / 6G” around 2030, all over the world including the United States, Europe, China, and Japan. However, since the strategies and activities, including long-term research and development of the subsequent generation (7G) are not yet visible, we should lead the world toward clarifying the long-term research and development issues of basic hardware technology related to communication and strategically promote research and development.

The research and development issues to be addressed in the future include the use of unexplored frequency regions, advanced use of wireless and optical communication, low energy consumption, high reliability, and low price of the communication systems, side by side with basic science and materials research that supports technological evolution, each of which are shown below.

(1) Research and development for the use of unexplored frequency regions

In order to significantly increase the data rate and capacity, it is desirable to use the terahertz band (100 GHz to 1 THz), which is a frequency region above the millimeter wave band of several tens of GHz. However, in such a high-frequency region, there will be problems such as suppressed diffraction, an increase in absorption of electromagnetic waves in the atmosphere, a decrease in power efficiency of radio wave generation, difficulty in signal amplification, and an increase in transmission loss of conductors and dielectrics. Thus, it will be difficult to transmit radio waves for long distances. To overcome these potential issues, research and development is necessary on array antenna technology that transmits radio waves only to the desired direction,

active use of radio wave reflection / transmission, high-efficiency terahertz wave oscillators / detection elements / amplifier circuits, new substrate material / conductor structure / dielectric material for low transmission loss, and high-frequency material characteristic evaluation method / evaluation tools.

(2) Research and development for advanced use of wireless communication and optical communication

Within the limited frequency band, it is necessary to develop technology that achieves higher speed and larger capacity with various multiplexing technologies. In addition, we will also work on extreme massive connectivity technology that makes possible the simultaneous connection to a large number of terminals including automobiles and IoT sensors, which will be required as a future communication system, and technology for extreme high reliable communication of information with extreme low latency to ensure real-time control. Furthermore, to produce various system configurations that take advantage of the features of wireless and optical communication, we will also work on technology that performs mutual conversion between wireless signals and optical signals and analog-digital conversion at high speed and efficiency. Since software technology plays an important role in the configuration of various systems, it is important to consider the cooperation with software when conducting research and development of these hardware technologies.

(3) Research and development for low energy consumption, high reliability, and low price

The functional requirements as the basic technology for next-generation communication are the above (1) and (2). However, in response to social requirements such as CO₂ reduction of network equipment, and reliability and resilience as social infrastructure, as well as utilizing the basic technology not only in communication systems but also in application fields such as computer networks including data centers and edge computing, radar systems, and IoT sensors, it is necessary to conduct research and development corresponding to low energy consumption, high reliability, and low price. This requires not only the pursuit of characteristics at the material and device level, but also the implementation of functional modules through the integration of devices and components. Therefore, we will conduct research and development of hybrid integration technology that integrates different materials and devices such as optical devices, advanced CMOS digital devices / circuits, high-frequency analog circuits, and compact antennas for advanced massive MIMO.

(4) Basic science and materials research that support technological evolution

In the above research and development, in addition to the items that can be produced by technological development making the best use of existing science and technology, there are also goals that are difficult to achieve just by the simple extension of existing technology. In addition, to respond to further demands of the communication technology, discontinuous evolution of technology will be required. To respond to these requirements, it is extremely important to promote research in a wide range of related basic fields, such as basic research in condensed matter physics, optical science, and research on emerging materials and process technologies.

In order to proceed efficiently with the above research and development on a long-term perspective, we would like to propose the establishment of shared research facilities capable of advanced high-frequency characteristic evaluation, device fabrication facilities capable of producing

in cooperation prototypes of devices and modules, and research facilities capable of verifying functions of devices and systems, as well as the establishment of a new research community which enables industry-academia-government collaboration, international collaboration, and interdisciplinary collaboration for the wireless and optical convergence (wireless and optical communications, analog and digital circuits, silicon and compound semiconductor devices, integrated processes, materials, measurement and evaluation, etc.), thus looking ahead to long-term funding and international standardization. In particular, the high-frequency characteristic evaluation tools and equipment related to the production of devices are expensive, and it is difficult for a single university to purchase and own them. Therefore, it is essential to develop shared facilities that can be used in common, and to build facilities and their operational structure that allow prototypes and evaluations of devices and integrated circuits. In addition, we envision the implementation of long-term research and development projects funded by MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology) and JST, aiming at the next generation (7G) of “Beyond 5G / 6G” which is expected to be implemented around 2040 and later, as well as the cooperation with the “Beyond 5G / 6G” projects conducted by MIC (Ministry of Internal Affairs and Communications) and METI (Ministry of Economy, Trade and Industry). The process of establishing a new community of wireless and optical convergence, requires the fusion area of communication and circuits, elements, and materials at IEICE (The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers) and JSAP (The Japan Society of Applied Physics) to be newly established or expanded. It is expected that those concerned will match the seeds of research from academia with the future needs of industry, and create short-term and long-term roadmaps to obtain common goals.

目次

1	研究開発の内容	1
2	提案を実施する意義	4
2.1	現状認識および問題点	4
2.2	社会・経済的効果	10
2.3	科学技術上の効果	15
3	具体的な研究開発課題	17
3.1	未踏の周波数領域の利用に向けた研究開発	18
3.2	無線通信と光通信の高度利用に向けた研究開発	21
3.3	低消費電力化・高信頼化・低価格化に向けた研究開発	25
3.4	技術進化を支える基礎科学・材料研究	27
4	研究開発の推進方法および時間軸	31
4.1	テラヘルツ帯のデバイス試作、 回路・アンテナ評価の共用施設の整備	31
4.2	新たな研究開発プロジェクトの推進	32
4.3	新たなコミュニティの形成	33
4.4	長期的視点での国際標準化に繋がる連携体制の構築	33
4.5	人材育成	34
4.6	時間軸	35
付録 1	検討経緯	37
付録 2	国内外の状況	40
付録 3	専門用語解説	44

1 | 研究開発の内容

「無線・光融合基盤技術の研究開発 ～次世代通信技術の高度化に向けて～」とは、フィジカル空間とサイバー空間をつなぐ高性能・高機能な次世代の通信技術に向け、これまでの無線通信と光通信、エレクトロニクスとフォトリソグラフィの知見や技術をうまく活用して新たな基盤技術（無線・光融合基盤技術）を創出するための研究開発戦略である。ここでの「無線・光融合基盤技術」とは、今後無線通信と光通信の利用形態の融合が進む中で、未踏の周波数領域であるテラヘルツ波を用いた高度な通信の実現に向けて、それぞれの主要技術であるエレクトロニクス技術とフォトリソグラフィ技術の知見や技術を融合することで新たに創出される要素技術・基盤技術群である。この技術融合と利用形態の融合による新たな無線・光融合基盤技術を創出する考え方と、基盤技術を活用する応用分野への展開の概念を図1-1に示す。無線通信が高速・大容量化すること、光通信との差が小さくなっており、両通信技術の利点・特長を活かして活用すること（利用形態の融合）が重要になる。また、無線通信のさらなる高速化・大容量化のためには、現状使われているマイクロ波帯（数GHz）やミリ波帯（数十GHz）のさらに上の周波数帯であるテラヘルツ帯（0.1THz～1THz）の利用が望まれる。しかし、このテラヘルツ帯になると、これまでのエレクトロニクス技術とフォトリソグラフィ技術の中間に位置して、それぞれの技術領域だけでは使用する素子・半導体デバイスの高性能化が難しくなる（テラヘルツ（THz）ギャップ）。そのため、両技術を融合して無線・光融合基盤技術を創出することが重要になってくる。この基盤技術は次世代の無線通信網、基幹通信網（光通信網）だけでなく、コンピュータネットワークやレーダー、センシングなどの応用分野への展開も期待される。今後取り組むべき具体的な研究開発課題として以下の4項目を挙げる。

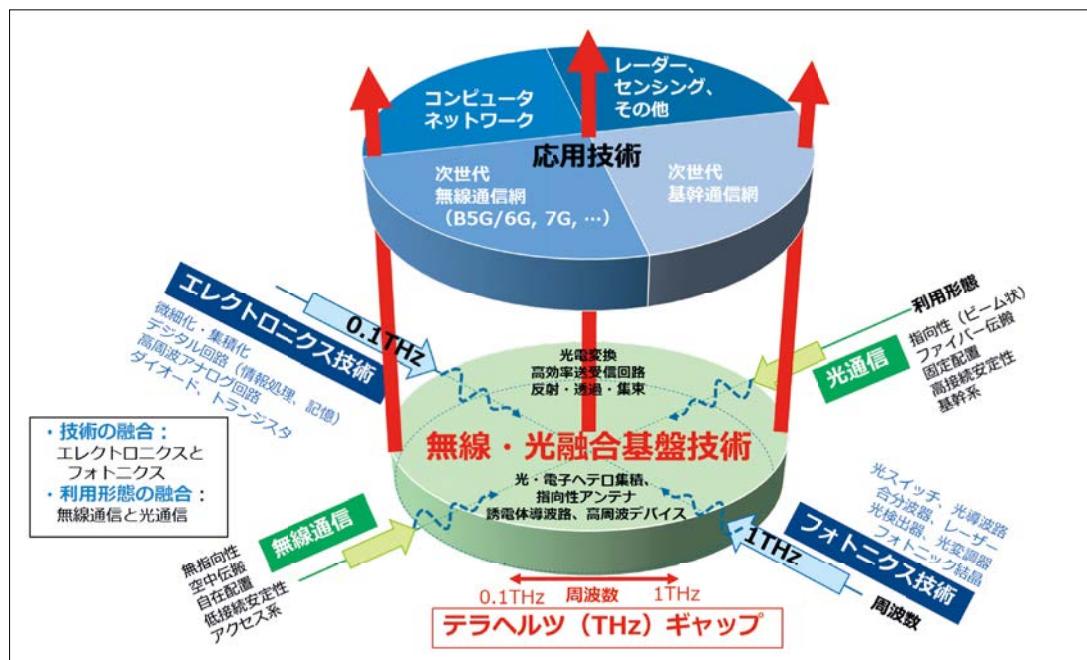


図 1-1 無線・光融合基盤技術研究開発の概念図

(1) 未踏の周波数領域の利用に向けた研究開発

無線通信の通信容量を大幅に増やすためにはこれまでのマイクロ波帯から数十GHzのミリ波帯、さらにその上の100GHzから1THzといったテラヘルツ波帯までの利用が重要になる。しかし、これらの周波数帯では、電波の回り込み減少、大気による電波吸収の増加、電波発生の発振効率の低下、信号増幅の困難化、導電体・誘電体の伝送損失の増大などの問題が顕在化し、電波を遠くまで飛ばすことが難しくなってくる。このため、テラヘルツ波に対して、目的の場所にだけ送信する指向性アンテナ、電波の反射・透過・集束の積極的な利用を可能にするデバイス、高効率の発振素子・検出素子・増幅回路、低損失の新たな基板材料・導電体構造・誘電体材料、高周波材料特性評価手法・評価装置などが必要になる。具体的な研究開発課題としては、電波の放射方向を制御するミリメートルレベルの微小なアンテナで構成されるフェーズドアレイアンテナ、電波の反射・透過・集束の制御を行うメタサーフェス・メタマテリアル・メタレンズ・クロック技術、テラヘルツ波の発振・増幅・検出が可能な先端シリコントランジスタ、化合物半導体トランジスタ、高周波ダイオード、量子カスケードレーザーなどの半導体デバイス、2波長レーザーの差周波発生など光技術を用いたテラヘルツ波発生技術、低誘電損失のポリマー基板材料、基板との接合界面が平坦な導電体形成プロセスなどがある。また、ビーム制御や回路基板全体の高周波回路シミュレーションのパラメータ決定の際に重要となるテラヘルツ領域での高精度材料特性評価手法や評価装置などもある。

(2) 無線通信と光通信の高度利用に向けた研究開発

限られた周波数帯域の中で、各種の多重化技術によりさらなる高速化・大容量化を実現する技術開発が必要である。また、次世代通信の機能として求められる、自動車やIoTセンサなど多数の端末が同時に接続できる超多数同時接続技術や、リアルタイム制御を可能とする超低遅延で安定して情報を送受信する技術などにも取り組む。さらに、無線通信と光通信の特長を活かした多様なシステム構成を実現する上で、無線と光通信の相互変換、アナログとデジタルの相互変換を効率的に行う技術にも取り組む。これらは、システム的な視点からソフトウェア技術の役割が大きくなるため、これらのハードウェア技術の研究開発はソフトウェアとの連携を考慮して行うことが重要である。具体的には、分散MIMO (multiple-input and multiple-output) における多重アンテナ制御技術、OAM (Orbital Angular Momentum: 軌道角運動量) の活用による多重化・アンテナ技術、光で直接無線信号を伝送するRoF (Radio over Fiber) 技術、超低遅延を可能とする高速A/D変換回路 (ADC: Analog-to-Digital Converter) ・D/A変換回路 (DAC: Digital-to-Analog Converter) 技術、ジッタ (遅延の変動) やノイズを低減する回路技術、広域ネットワークの高精度な同期を可能とする超小型原子時計/光格子時計技術などがある。

(3) 低消費電力化・高信頼化・低価格化に向けた研究開発

次世代通信技術の基盤技術としての機能的な要求は上記の(1)(2)になるが、ネットワーク機器のCO₂削減や社会インフラとしての信頼性・強靱性といった社会的な要請に応え、さらにこの基盤技術を通信用システムだけでなく、データセンターやエッジコンピューティングなどのコンピュータネットワーク、レーダーシステム、IoTセンサなどの応用分野において利用していくには、低消費電力化・高信頼化・低価格化に対応する研究開発も必要である。このためには、材料やデバイスレベルでの特性の追求だけでなく、デバイス・部品を集積化し機能モジュールとすることが重要である。特に、光デバイス、先端CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) デジタル回路、高周波アナログ回路、アンテナなどの異なる材料・デバイスを一体化するハイブリッド集積化およびモジュール化技術の研究開発に取り組む。具体的には、光電変換デバイスの高効率化と光トランシーバー・レシーバーとしてのモジュール化、先端CMOSデジタル回路と化合物半導体高周波デバイス・回路からなる高周波無線トランシーバー・レシーバー、テラヘルツ高周波回路とフェーズドアレイアンテナや高周波導波路まで集積したテラヘルツ高周波モジュールなどの集積モジュールの研究開発を行う。また、CMOSプラットフォームと互換性のある材料やデバイスの研究開発、光デバイス、

先端CMOSデジタル回路、高周波アナログ回路、アンテナなどの異なる材料・デバイスを一体化するハイブリッド集積化プロセス技術の研究開発、高密度半導体デバイス・回路の放熱・サーマルマネジメント（熱設計）の研究開発を行う。

（4）技術進化を支える基礎科学・材料研究

上記（1）～（3）の研究開発においては、既存の科学・技術を最大限活かした技術開発で実現し得る項目に加え、既存技術の単純な延長では実現困難な課題も含まれる。また、高速・大容量化、高効率化、便利性向上など、今後も通信技術への要求は一層高まることは確実である。それらの要求に応えるためには、技術の不連続な進化が必要となる。テラヘルツ帯といった未踏領域の研究開発、極限性能の探求においては、新しい概念や新しい現象、新しい材料などの活用が不可欠であり、基礎研究が担う役割は極めて大きい。様々な領域を関係基礎分野として捉え、物性科学や光科学などを含む基礎研究、エマージング材料やプロセス技術に関する研究などを長期的視点で継続的に推進することが極めて重要である。具体的な例として、テラヘルツ領域で多彩な応答を示すグラフェンなどの二次元材料やその誘導体、反強磁性材料などの新材料科学、新たな光電変換技術や熱制御などへの利用が期待されるフォノンポラリトンなどの準粒子の特性理解・制御、電磁波がもつトポロジカルな特性の追求などが挙げられる。

上記の研究開発を効率的に進めていくために、長期的な視野に立ち、高周波数領域における高度な材料特性評価が可能な共用施設、デバイス・モジュールなどの試作が可能な拠点とその拠点間の連携、応用を想定したモジュールの機能検証可能な研究拠点などを整備するとともに、研究シーズから新たな基盤技術の創製を目指した長期的なファンディング、国際標準化を見据えた産学官連携、無線・光融合を主軸とする異分野（無線通信、光通信、アナログ・デジタル回路、シリコン・化合物半導体デバイス、集積プロセス、材料、計測・評価など）が集まる新たな研究コミュニティの形成を促進していくことを提案する。具体的には、材料の高周波特性評価装置やデバイスの作製に関わる装置が高額になっており、単独の大学では購入・保有することが難しくなっているため、誰でもが利用できる共用施設の整備と、デバイス・集積回路が試作・評価できる施設や仕組みの構築は必須である。そのためには、国の研究機関である情報通信研究機構（NICT）、産業技術総合研究所（AIST）、物質・材料研究機構（NIMS）、オープンイノベーション拠点のTIA（<https://www.tia-nano.jp/>）、文部科学省の「マテリアル先端リサーチインフラ」（https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/material_research_results_00001.html）などの施設の利用や連携が重要である。また、2025年頃の国際標準化、2030年頃の実用化を見据えた研究開発が総務省・NICT、経済産業省・NEDOのプロジェクト・ファンディングで行われているが、文部科学省・JSTによる7Gの商用化が予想される2040年頃やさらに先を見据えた中長期の研究開発プロジェクト・ファンディングの実施と既存のプロジェクトとの連携が望まれる。関係各省の連携およびこれらのプロジェクトの連携により、無線・光融合基盤技術に対するシームレスな研究開発体制の構築が期待される。無線・光融合の新たなコミュニティの形成においては、電子情報通信学会や応用物理学会などでの通信と回路、素子、材料の融合領域を新設あるいは拡大し、そこでの関係者がアカデミアのシーズと産業界の将来ニーズのマッチングを図ることや、共通の目標・価値観を得る短期・長期のロードマップを作成することなどが期待される。

2 | 提案を実施する意義

2.1 現状認識および問題点

(通信技術の進展と次世代通信技術)

近年、高度なデジタル社会の実現に向け、フィジカル空間とサイバー空間をつなぐ高速・大容量・低遅延・多数同時接続・低消費電力・セキュアな次世代の通信技術が期待されており、それに向けた様々な技術レイヤーでの研究開発が世界中で活発になっている。通信は、これまでの通話やメール、SNS、写真・動画送受信、テレビ電話などといった個人の利用だけでなく、工場、農業、サービスなどの産業面での利用、災害時の接続確保など社会インフラ・基盤としての役割も重要になってきている。特に、今後はIoTを活用した様々なサービスの提供が期待され、分散コンピューティングやマルチアクセスエッジコンピューティング（MEC：Multi-access Edge Computing）とAIを活用することで低遅延の効率的な無線制御やネットワーク制御を行うなど、様々な応用やサービスに適した形態のネットワークの構築が可能になってくると考えられる。そのため、これらの様々な新たな使い方に対応できる基盤技術として何が必要かを明らかにし、その研究開発に早期に取り組み、使える技術としておくことは重要である。

通信技術は大きく分けて、基幹通信網に使われる光ファイバ通信技術と、アクセス系に使われる無線通信技術からなり、これまでは別々の技術分野として発展してきた。光ファイバ通信は、伝送損失がほとんどないガラスファイバ中に赤外光を通すことで、大容量のデータを高速に遠距離に伝送することができ、日本の強い技術領域となっている。一方、無線通信技術は携帯電話などの移動体無線通信に代表されるように、1980年頃から急速に一般に普及し、第1世代（1G）から第5世代（5G）まで約10年毎に世代交代しながら、通信速度・通信容量を一桁ずつ向上させてきた。第3世代の直前までは、日本は強い技術を持ち、世界的に先端通信技術、通信システム開発および通信ビジネスの展開を行ってきたが、第3世代以降は、世界標準仕様を有利に定めることから始まる国際競争へと変化する状況となり、日本の通信機器・システムの技術競争力が低下している。

移動無線通信は近年の5Gに代表されるように高速化・大容量化が進み光通信との差が小さくなってきており、無線通信技術と光通信技術のそれぞれの特長・利点を活かして、様々な応用やサービスに最適なネットワーク構築に向けた技術開発やシステム設計が重要になってくる。このため、基地局のオープン化の流れとともに、様々な技術レイヤー、ステークホルダーを巻き込んだBeyond 5G/6Gに向けた研究開発が世界的に活発になってきている。詳細は付録2に記載しているが、例えば欧州では2018年にフィンランドのオウル大学を中心に6Gのプロジェクト、Horizon 2020で集積フォトニクスに関するプロジェクトなどがある。日本においても、2020年に産学官連携の「Beyond 5G推進コンソーシアム」、NTTを中心にIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）Global Forumなどコンソーシアム・協議会の設立などがあり、NTTドコモ、NICT、NECなどからBeyond 5G/6Gのホワイトペーパーが発表されている。

これまで無線通信の高速化・大容量化は数百MHz～数GHzの周波数を用いて、FDMA、TDMA、CDMA、OFDMAなど主に通信方式の高度化や多重化により行われてきたが、このような通信方式による飛躍的な大容量化は難しくなっている。既存の周波数帯ではすでに通信や他の利用目的に使われており、電波の空きがない状況である（コラム1参照）。このため、5Gからはまだ空きがあり、周波数帯域が広く取れるミリ波帯の利用が行われるようになってきている。これは電波利用の転換期と考えることができ、今後のBeyond 5G/6Gやその後の7Gといった世代でもさらなる大容量化を求めて、これまで使われていない高周波帯の利用が進められていくと考えられる。その意味では、ミリ波帯のさらに上で圧倒的に広い周波数帯域が確保でき

るテラヘルツ帯（0.1THz～1THz）といった周波数帯が注目される。もちろん、テラヘルツ帯といった高周波になると大気中の減衰が激しく遠くまで届かないといった欠点もあり、全ての無線通信がこの周波数に置き換わるわけではなく、従来のマイクロ波帯やミリ波帯と共存し、対応するアプリケーション・サービスに最適な周波数帯が選ばれるシステム構成になると考えられる。例えば、狭い範囲での高速・大容量通信の要求として、スポーツスタジアム、集会場、家庭などでの高精細 VR・AR 映像の視聴、デジタルツインを活用して三次元設計データ画像とリアルな映像とを重ねた作業などが考えられる。また、大都市部では狭い範囲に多くの人が集まっており、超多数同時接続・超大容量通信の要求も大きいと考えられ、このような場面でのテラヘルツ帯の利用は効果的である。さらに、将来的には大気中の減衰の無い宇宙空間での衛星間の大容量通信などへ期待も高い。地震や台風などの自然災害における通信接続の確保は非常に重要であり、光通信網、移動体無線通信網だけでなく、衛星通信網の大容量化も期待される。2022年1月のトンガ沖の海底火山の大噴火により光通信ファイバが切断されて、唯一衛星回線が使えたことは記憶に新しい。

コラム1

無線から光までの周波数帯と無線周波数の利用状況

無線通信は同じ空間を共有しており、有線通信のように物理的なケーブルで分離されていないため、同じ周波数を利用すると、混信や干渉による通信障害が発生する。このため、無線通信では用途毎に使用する周波数の割り当てが行われている。

図C1-1に無線から光までの周波数帯と代表的な無線周波数の用途を示す。

我々が日常利用しているスマートフォンなどの携帯電話には、主に800MHz～5GHz帯が割当てられており、その周波数帯を利用してサービスが提供されている。それ以外にも、電子レンジは2GHz帯、衛星放送は12GHz帯、衝突防止レーダーは76GHz帯と、利用する周波数帯が決められている。

電波は、周波数が高くなる（波長が短く）につれて直進性が強くなり、建物などの障害物の回避が難しくなる。これまで、携帯電話では、広いエリアを効率的にカバーするために、数GHz帯のマイクロ波が利用されてきた。

一方、携帯電話の利用は、スマートフォンの普及と通信速度の高速化に合わせて、音声・メールから、SNS、画像、動画、ゲームなど多様化していると共に、利用者自体の増加に伴いデータ量が急増している。無線通信は、利用する周波数の幅（帯域）が広いほど一度に沢山の情報を高速に送ることができる。このため、5Gでは、通信速度の高速化と大容量化の要望から、マイクロ波に加えて広い帯域を確保できる28GHz帯のミリ波が利用されている。

図C1-1の下段（新脚注 5.X115による陸上移動・固定業務応用への周波数特定）は、世界の周波数帯の利用方法を定める世界無線通信会議の2019年会合（WRC-19）でBeyond 5Gのために特定された周波数帯である。既に特定されている71GHz～275GHzの間の周波数帯（一部）に加えて、さらに高い275GHz～450GHzの間の周波数帯（一部）が特定された。

将来のBeyond 6Gでは、さらに広い帯域を確保して、さらなる超高速・大容量

通信を実現するために、Beyond 5Gよりもさらに周波数の高いテラヘルツ帯の活用が期待されている。

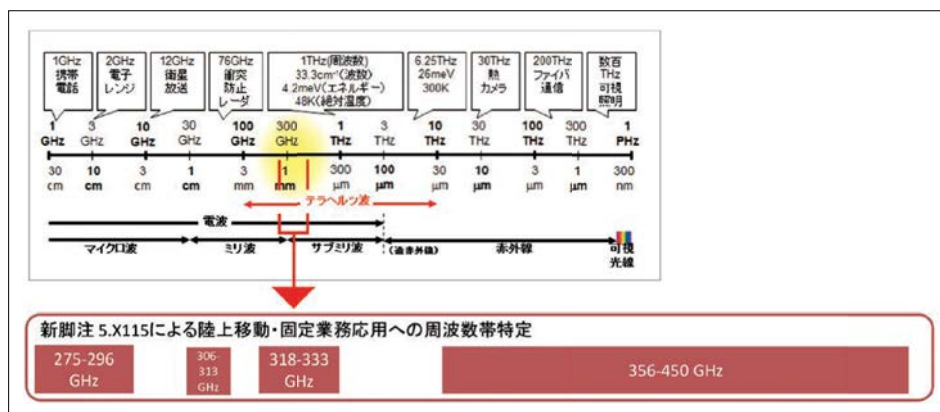


図 C1-1 WRC-19周波数特定結果

(出典：NICT NEWS 2020 No3 “電波と光の間の電磁波「テラヘルツ帯」を開拓 Beyond 5G、さらにその先へ”)

テラヘルツ帯といった高周波帯の利用については技術的な問題も多く、「広義のテラヘルツギャップ (THz gap) の克服」がこのような次世代通信技術を拓く鍵となる。狭義のテラヘルツギャップは、コラム2に記載しているように高効率な発振デバイスが無い周波数領域のことである(出典: Nature Electronics, “Terahertz integrated electronic and hybrid electronic-photonic systems”, vol. 1, 622–635, 2018.)。ここで定義する広義のテラヘルツギャップは、テラヘルツ帯を通信に利用するための基盤技術がまだ準備されていない状態を表している。ミリ波帯までの無線通信技術はすでに5Gで実用化されており、光の領域(赤外光)も光ファイバ通信技術が実用化されているが、これらの間の周波数領域であるテラヘルツ帯については、高効率発振技術、高感度受信技術、損失の少ない伝送路、指向性アンテナ技術など、実用的な通信技術に使える基盤技術がまだ揃っていない。

テラヘルツ帯はこれまでの無線と光(可視光・赤外光)の間の周波数領域であり、通信への積極的な利用に向けた研究開発がなされていない「未踏の周波数領域」である。この領域では効率的な電波の発振や変調、信号増幅、低損失伝送などが難しい(狭義のテラヘルツギャップ)。また、電波の直進性が強くなり障害物を回り込むことができないことや、大気中の減衰が増大するため長距離伝送が難しい。この未踏の周波数領域を通信で使えるようにするためには、これらの問題に正面から立ち向かうことが必要である。例えば、電子デバイス(エレクトロニクス)からのアプローチとして、100GHz回路動作の65nm～45nmノードプロセスによるシリコンMOSFET、最大発振周波数(f_{max})300GHzのInP系化合物半導体トランジスタなど、高周波数の発振・変調・増幅・検出を行う素子の開発が報告されるようになってきた。ただし、実用的な増幅器には使用周波数の3倍程度の f_{max} が求められるため、テラヘルツ帯での使用に満足できるようなレベルにはまだ達していない。光デバイス(フォトリソ)からのアプローチとしては2つの発振波長の異なる半導体レーザーを用いた差周波発生や、非線形光学効果を用いた新しいタイプの量子カスケードレーザーの研究開発が進められている。これらのさらなる出力向上が期待される。空気による減衰が大きくても遠くまでテラヘルツ波を到達させるためには、これまでのように全方向に送信するのではなく、目的の方向だけに送信する指向性ビームにすることが考えられ、そのための指向性アンテナ技術としてフェーズドアレイアンテナの研究開発が進められている。テラヘルツ領域のフェーズドアレイアンテナ技術においては、それぞれのアンテナへ高い精度の位相差を持った電波を供給する必要性から、高周波回路の安定性と特性の揃った伝送線路、ミリメートル

ル以下の加工精度を持ったアンテナが不可欠であり、まだ研究開発が始まったばかり段階にある。強い直進性の問題を克服するためには、反射波や透過波を積極的に利用することが考えられるが、単一構造の金属材料や誘電体ではテラヘルツ波を効率的に反射・屈折することは困難なため、人工的な構造を用いた新たな材料（メタマテリアル、メタサーフェス）が注目されている。すでに、テラヘルツ帯に向けたメタサーフェス反射板、メタサーフェスレンズなどの試作は進められているが、まだ実用的なレベルには達していない。

このように、テラヘルツ帯の通信応用に向けた基盤技術は現時点では実用レベルには遠いものが多いが、最近急速に関心が高まっており、研究開発が活発化してきている。例えば、半導体デバイスおよび集積回路のトップクラスの国際会議であるIEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers：米国電気電子学会）の2021年のIEDM（International Electron Devices Meeting）および2022年のISSCC（International Solid-State Circuits Conference）ではテラヘルツ帯無線通信デバイス・回路に関するセッションが作られている。このような動きの中で、日本はテラヘルツ帯を用いた材料の評価技術やセンシング技術の研究が長年続けられてきており、テラヘルツ要素技術の研究開発では世界のトップレベルの技術蓄積を持っている。また、付録2に示すように次世代通信のハードウェアに関する総論文数では日本は3位であり、技術的な優位性を持ち世界から注目される位置にある。例えば2021 IEEE IEDMでは、招待講演の一つとして日本から次世代通信用の光技術を活用したテラヘルツ帯のデバイス技術についての発表があった（T. Nagatsuma, et al., “Enabling Device Technologies for Photonics-assisted Millimeter and Terahertz Wave Applications”, Tech. Dig. 2021 IEEE IEDM, pp. 246–249, 2021.5）。今後も、日本での通信応用に向けた先駆的な取組が期待される。

コラム2

テラヘルツ波とテラヘルツギャップ

テラヘルツ（THz）は、電波と光の中間に存在する電磁波の周波数領域であり、明確な定義はないが、概ね0.1THz（100GHz、波長3mm）～10THz（波長30μm）を指す。テラヘルツ波の特徴として、光のような直進性と電波のような高い透過性を持ち、極めてエネルギーが低いため、X線（100PHz～）のような被爆による生体反応の恐れが少ない。また、ビタミンや糖、医薬品、農薬などさまざまな試薬類には、テラヘルツ帯に固有の吸収スペクトル（指紋スペクトル）が存在する。この分子識別能力を利用する分光分析装置や、透過性を利用した非破壊検査機器などの応用に向けた研究開発がこれまでに行われてきた。さらに、近年はテラヘルツ帯の非常に広い周波数帯域を利用した超高速・大容量通信の実現が期待されている。

このように非常に利用価値の高いテラヘルツ帯であるが、“テラヘルツギャップ（THz-Gap）”（本戦略プロポーザルの中では、狭義のテラヘルツギャップと定義）という大きな技術的課題があり、通信に応用するためにはこれを克服することが不可欠である。図C2-1はこれまでに報告されている半導体デバイスによる発振器の最高出力と周波数の関係を示したものである。右の図のトランジスタや、左の図の各種の2端子素子（ダイオード）など電子デバイスからのアプローチでは、高周波

になるにしたがって急激にその出力が低下していく。また、左の図のレーザーデバイス（光デバイス）からのアプローチでも、低周波になるにしたがって出力が低下する。このように、どちらからのアプローチでも、1.5THz付近を中心として高い出力を得ることが困難な“テラヘルツギャップ”が存在している。

このテラヘルツギャップの克服は容易ではないが、原理的に克服できないというものではない。電子デバイスからのアプローチでは、例えば高移動度の半導体を用いてゲート長をnmオーダーまで微細化するとともに、ゲート抵抗とゲート寄生容量を低減したトランジスタ構造の実現が期待される。また光デバイスからのアプローチでは、量子カスケードレーザー（QCL）や、2波長レーザーと非線形光学結晶を用いた差周波発生技術による高効率テラヘルツ波発生などが期待される。さらには、これまでのエレクトロニクス技術とフォトン技術の知見を活用した新たなテラヘルツ波発振原理の創出に期待したい。

（参考資料：「映像情報メディア学会誌 Vol.67, No.6, pp.460～464（2013）：テラヘルツ波イメージング」、
「応用物理学会誌 34巻9号, pp.450～457（2005）：テラヘルツ波の利用技術の進展」、
「情報通信研究機構季報 Vol.54 No.1 2008: NICT テラヘルツ技術開発の位置付け及び展望」）

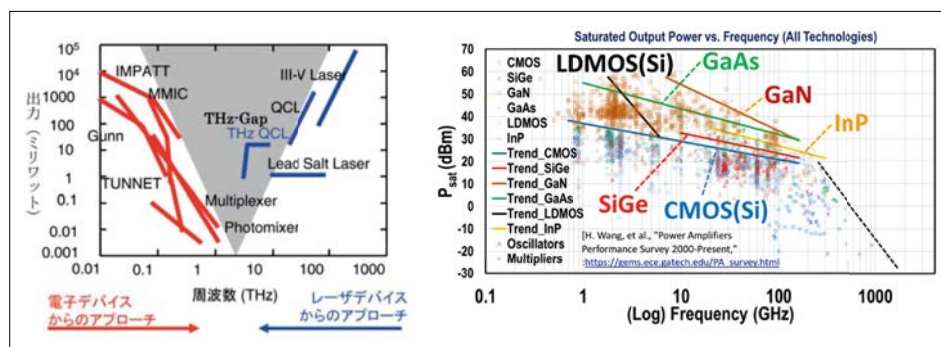


図 C2-1 半導体デバイスの連続波出力と周波数の関係

（出典：情報通信研究機構季報 Vol.54 No.1 2008、および https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html）

無線通信の大容量化に伴って、基幹通信や基地局への通信に使われる光通信技術にもさらなる大容量化の要求が高まってきている。これまでの時分割多重、波長多重、空間多重（マルチコアファイバ）による多重化技術だけでなく、無線通信技術が転用された光符号分割多重、光の位相や偏波を用いる光デジタルコヒーレント通信などの新たな技術開発も重要になってきている。これらは、従来よりもノイズの影響を受けやすくなっているため、高度な信号処理が不可欠である。また、高速なデジタル信号処理に使われるDSP（Digital Signal Processor）などのチップの消費電力は膨大であるため、これらのシリコン半導体集積回路の大幅な低消費電力化が重要になっている。

さらに、クラウドやデータセンターでの大規模コンピュータネットワークや、分散コンピュータネットワークにおけるデータ通信の高速化・大容量化は必須であり、高速化と低消費電力化を両立する光ネットワークへの期待は大きい。ここでも高速・大容量・低消費電力の光通信技術だけでなく、多様なコンピュータネットワークに対応できるように部分的な無線通信の利用も含め総合的・多角的に通信技術を考える必要があり、光通信と無線通信を自由に組み合わせることが可能な基盤技術が求められている。

（日本の次世代通信に対する長期的な基盤技術研究の取組の遅れ）

これまでの無線通信技術は、半導体のロードマップと同様に、一世代ごと（約10年）に通信容量が一桁増加してきており、使用する周波数（キャリア周波数）の帯域の増加と符号化や非直交通信などの概念の進展により今後もこの傾向は続くと考えられる。したがって、7Gやさらにその先を見越した長期的視点での研究開発は、学術分野の発展だけでなく産業的にも重要である。

特に、テラヘルツギャップの克服には、4G/5Gの技術の単なる延長では実現が難しく、様々な課題を解決するためには革新的な技術に対する裾野の広い長期的な研究開発の取組が期待される。特に、新たな材料や素子などのハードウェアの研究開発には時間がかかるため、7Gやその先の技術に対応した先行的な取組が必要である。また、新たな技術の創出から、工学的に実用可能な技術へとレベルアップし、さらにシステムに要求される性能にまで高めていくためには、材料、素子、回路、システムなど異分野の研究者・技術者の協力が不可欠である。

海外ではテラヘルツの無線通信利用を目指した光電融合デバイスの研究プロジェクトなどがすでに進められている。詳細は付録2に記載しているが、米国ではテラヘルツ研究や光電気ハイブリッド集積回路開発に関するプロジェクトが推進され、欧州ではテラヘルツ研究、無線・光ハイブリッド集積技術開発などが早期に開始され、中国ではテラヘルツ通信の試験衛星打ち上げが行われている。一方、日本では先に述べたようにBeyond 5G/6Gに関するコンソーシアムの設立や総務省のプロジェクト、ポスト5Gやコンピュータネットワークに向けた経済産業省のプロジェクトなどが実施されているが、その先の世代（7G）を見据えたテラヘルツギャップの克服に向けたプロジェクトや取組はまだない。

次世代無線通信技術に関するホワイトペーパーが、国内の通信キャリアやベンダー、NICTなどから発表されているが、ホワイトペーパーの内容はビジョンが中心であり、ミリ波・テラヘルツ波の重要性が認識され必要な技術項目が列挙されているものの、ハードウェアに関しての具体的な研究開発課題についての記載は少なく、アカデミアを含めた長期的な研究開発への取組戦略が明確になっていない状況である。7Gやその先を見据えて、アカデミアの新たな技術の芽を活かし、競争力のコアとなる基盤技術に育てていくような長期的な視点での研究開発のプロジェクトや、それを支える体制が示されていない状況がこのまま続けば、将来の海外との技術競争で後塵を拝することが懸念される。

（日本の通信産業の弱体化）

第5世代（5G）モバイル基地局分野での日本の通信企業の出遅れが指摘されている。世界の市場は、基地局とモバイル機器との間は3GPP（Third Generation Partnership Project：第3世代から第5世代移動体無線の仕様の検討・作成を行う標準化プロジェクト）などにより標準化されている。しかし、基地局およびその制御システムは、エリクソン、ノキア、華為（ファーウェイ）の3社がそれぞれの仕様により機器を提供しており、各社の仕様に大きく依存（ベンダーロックイン）していて寡占状態になっているとの指摘もある。日本企業の弱体化の本質は、研究開発リソースへの投資能力の問題に加えて、4G、5Gモバイル基地局実現のための複雑化した無線装置を実現する回路やA/D変換回路・D/A変換回路などの高速・高性能半導体の開発能力の欠如にある。また、その仕様につながる無線方式の標準化活動においてグローバルなリーダーシップを発揮できず、勝ち組に入れなかったことも原因の一つとして挙げられる。この状況を打破するために、基地局を構成する機器間のインターフェースが標準化されたOpen RAN仕様による基地局をパートナーベンダーとともに開発し提供する試みが進められている。また、Local 5Gの取組により新たな5Gの活用市場を産み出す取組もなされている。

Beyond5G/6G以降は、通信装置・システムのオープン化の流れの中で、新たな周波数領域に関係する強い技術シーズ（基盤技術）を創出することに加え、その技術を如何に世界に広めていくのか、どのように標準化するか、通信を利用してサービスを提供する業界を巻き込んでどのような新たな価値を創出するかなどの戦略面の検討も重要になっている。

未踏の周波数領域への挑戦、テラヘルツギャップの克服のための新たな基盤技術が必要になってきている状況は、従来の産業構造を変えるチャンスでもあり、テラヘルツギャップを埋める基盤技術を日本の通信産業の強みの起点にできる可能性もある。また、無線通信と同様に産業的に落ち込んだ半導体産業においても、先端半導体の研究開発だけでなく、テラヘルツ無線デバイス、光通信デバイスの研究開発、様々な材料の素子を集積するヘテロ集積技術の研究開発を通して、再強化できる可能性もあり、このような研究開発を積極的に進めていくことが望まれる。

（通信分野コミュニティの人材不足・連携不足）

産業界では関連基盤研究に関する研究開発が縮小しており、その結果、関連分野においてアカデミアと産業界の溝が拡大するとともに、通信分野の縮小感から関連分野に対する学生の興味やアカデミアの関心が低下しつつある。実際、無線通信分野における我が国の国際的存在感は低下しつつあると言わざるを得ない状況である。一方、次世代通信網での利用が期待されるテラヘルツ波の技術は日本の得意とする電子デバイス技術、無線技術、光技術の境界融合領域であり、我が国が高いプレゼンスを示し得る技術領域である。しかし、各分野の研究者は同じ内容でも異なる技術用語を使い、お互いにほぼ独立に自身の分野の研究を進めているのが現状である。例えば、テラヘルツ波は国内でも広く研究されているが、その多くはテラヘルツ発生や物性科学への応用、計測技術などに集中しており、通信技術への展開を目指した研究は少ない。これも産業界とアカデミアとの対話の欠如によりもたらされた結果の一つと考えられる。一方、海外においては、電子技術と光技術、無線研究者と光研究者、さらにはアカデミアと産業界が強力にタッグを組んで、材料から素子、回路、システムまで次世代通信技術の研究開発を強力に推進している。高度なデジタル社会に向け、フィジカル空間とサイバー空間をつなぐ高速・大容量・低遅延・多数同時接続・低消費電力・セキュアな次世代の通信技術が世界的に期待される中、世界に伍していくためには、日本の得意とする材料技術、光技術、テラヘルツ計測技術などの技術領域を中心に、様々な分野の研究者を集めて協調・連携・融合を図り、次世代通信技術のコアになる技術を世界に先駆けて創出していくことが求められる。

2.2 社会・経済的効果

◆社会的効果

（高度なデジタル社会の実現）

アナログ携帯電話で始まった移動通信システムは、第2世代（2G）でデジタル化され飛躍的に加入者数が増えた。その後、第3世代（3G）におけるインターネット常時接続、第4世代（4G）における映像通信の一般化を経て、第5世代（5G）ではモノのインターネットのように人だけでなくモノも繋がる通信基盤となってきた。次世代の移動通信システム（Beyond 5G/6G）においては、人、モノ、サービスが様々な形態で接続されると考えられる。

第5期科学技術基本計画で提唱され、第6期科学技術基本計画でその実現が謳われているSociety 5.0は、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会である。Society 5.0では膨大な数のモノが生成する大量のデータをフィジカル空間とサイバー空間においてやり取りする。このやり取りのためには、様々な場所や移動するモノから映像や音声、あるいは様々なセンサから得られるサンプリング周期の短いデータをリアルタイムに収集・分析を行い、その結果を必要ところにフィードバックしなければならない。そこでは、高度な通信性能が要求される。

無線・光融合基盤技術を活用することにより、無線通信と光通信とをシームレスにつなぐためのテラヘルツ

送・受信機、無線光変換器などの様々な装置を構築することが可能となり、100Gbpsといった高速・大容量、1ms以下の低遅延で安全性の高い次世代の無線通信が実現される。そして、これまで以上に高度な通信システムを社会基盤として提供することが可能になる。この結果、様々な産業、生活の場面でフィジカル空間とサイバー空間の融合が進展し、国民の安全と安心を確保する持続可能で強靱な社会、一人ひとりの多様な幸せ（well-being）が実現できる社会が実現されることになる。

例えば、通信が途切れてしまったり大きな遅延が発生したりすることが許されないクリティカルな応用領域の一つである健康医療への貢献が期待される。コロナ禍を機会に遠隔医療に対するニーズが高まっており、医療のDX（デジタルトランスフォーメーション）化における遠隔手術が現実のものとなってきている。現状の手術ロボットは手術室にあるロボットを隣接する部屋から有線のケーブルを使って操作するものであるが、これが遠く離れた場所からもロボットを操作して手術ができるようになる。このような遠隔手術においては、患者を手術する手術ロボットとそれを遠隔で医師が操作するコックピットとが通信回線でつながれる。ここでは8K相当の高精細画像や手術ロボットの触覚センサ出力を低遅延（10ms以下）で操作医師にフィードバックするとともに、医師の指令や手術ロボットへの制御信号を低遅延で手術現場に伝達する必要があり、無線・光融合基盤技術を用いた大容量・高速・低遅延の次世代通信技術の実現により、遠隔手術の実用化が進むものと考えられる。

また、自動運転や快適な車内通信環境の実現への貢献も大きいと考えられる。市街地のように多くの自動車が集まった混雑した状態でも、約1台/m²の接続が可能な超多数同時接続と、細かなアンテナの指向性制御によるシームレスなハンドオーバーにより、基地局との常時接続が可能になる。また、超低遅延での車の位置情報の送信と環境情報の受信から、リアルタイムの自動車の制御が可能になり、レベル5の完全な自動運転の実現が期待される。さらに、電波が入りにくいバスなどの車内においても、車外のアンテナで受信した信号をリアルタイムで光信号に変換し、車内でその光信号を再度無線信号に変換することで、車内のそれぞれの乗客にとって安定した快適なインターネット環境が得られる。

日々の暮らしにおいても変化を与えていくと考えられる。コロナ禍でスポーツ観戦や旅行が自由にできなくなっている中で、次世代の通信により100Gbpsレベルの通信容量が可能になると、8K相当の高画質で臨場感の高い映像がリアルタイムで家庭内や移動中に見られるようになる。仮想現実技術と組み合わせることにより、サイバー空間内で他の人たちと一緒にスポーツ観戦や、一緒に疑似旅行を体験できるなど、満足感の高い経験をすることも可能になる。

このように、高度化していく通信は社会基盤として重要になってきており、産業構造や社会の構図を大きく変えていく可能性がある。通信技術の進展により受ける社会的な恩恵も大きいですが、一方で通信が途絶えた時の影響など社会的に検討しておくべき課題も多い。例えば、遠隔手術や自動運転中に通信が途絶えてしまった場合には、手術ミスや自動車事故に至る可能性もあり、そうならないための安全対策、事故に至った場合の責任の所在などについて十分に検討しておくことが望まれる。また、近年は異常気象、地震などの自然災害も多くなっており、自然災害が起こった時に通信が途絶えないように、複数の通信方法・通信チャネルを確保しておくことも望まれる。例えば、2022年1月に起こったトンガ沖での海底火山の大噴火による海底光通信ケーブルの切断は記憶に新しいところである。社会的に与える影響も大きくなってきており、将来の通信の利用方法や通信技術開発の方向などに関しては、今後は多様なステークホルダーを交えた議論を行うことも重要と考えられる。

コラム3

通信システムにおけるCO₂削減

急速に進むデジタル化に伴い、通信ネットワークの消費電力の増加が懸念され、関連する報告書がいくつか公表されている。予測方法や算出仮定など根拠が疑わしい場合もあり、その数値には注意が必要であるが、例えば、総務省の「Beyond 5G戦略」で引用している数値では、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）になるとしており、Beyond5Gでは、現在の1/100程度の消費電力に抑える必要がある、と提言している。また、ネットワーク系の消費電力については、JST炭素社会戦略センターの試算[LCT-LCS、”情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響（Vol.3）、LCS-FY2020-PP-04]で、ネットワーク全体の消費電力は2018年時点で国内は23TWh、世界では490TWhと推定している。この数値をベースにネットワーク関連が年率27%で拡大したと仮定した場合、現在の最新の市販品レベルの技術を前提に将来の消費電力を試算すると、国内では2030年に2018年比で約4倍の93TWh、2050年には約200倍の9,000TWhに、世界では2030年に約5倍の2,400TWhに、2050年には約530倍の26,000TWhになるとしている。実際には経済性や電力供給機器の能力といった需要側からの制約でそこまで電力消費が増大することはないと思われるが、個々のデジタル機器の大幅な消費電力の低減がない限りは、消費電力が増大してCO₂排出量の増大を招くことは明らかであり、持続可能な社会としてのSociety5.0に代表される高度なデジタル社会の実現は困難になる。一方、ICT機器の普及による高度なエネルギーマネジメントは、産業界におけるCO₂排出量の削減に大きく貢献すると期待されている。デジタル化の促進、ICTの利活用の阻害要因となるネットワーク全体の消費電力増大の抑制は大きな課題である。

革新的な省電力化の重要な技術の一つが光を使った通信ネットワーク構築である。その取組の一例がIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想であり、光を中心とした革新的技術を活用して超高速・大容量通信と膨大な計算リソースなどを提供する。従来のネットワーク比較で、伝送容量125倍、電力効率100倍、E2E（End to End）の遅延1/200の目標を掲げている。このIOWN構想によるCO₂削減効果については、図C3-1に示すように、NTTグループの環境ビジョン[NTT Green Innovation toward 2040、<https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/09/28/210928a.html>]の中で、電力消費量削減を通してグループ内の温室効果ガスを45%削減することが示されている。また、光電融合技術などIOWN技術の普及率が50%程度になれば、2040年度に日本全体の温室効果ガスを0.2億トン削減（削減率：4%）し、世界では3億トン（削減率：2%）の削減効果があるとしている（CO₂排出係数：日本：0.185kg-CO₂/kWh、世界：0.130kg-CO₂/kWhで算出）。

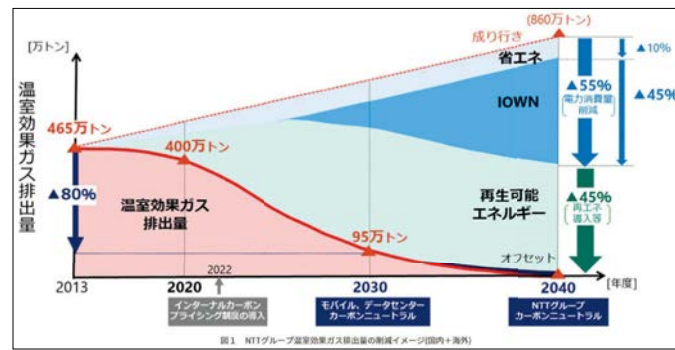


図3-1 NTTグループの温室効果ガス排出削減のイメージ（国内外の合計）

（消費電力（CO₂排出量）の削減）

上述のような高度なデジタル社会においては、これまでになかった詳細なデータを基にした高度なエネルギーマネジメントが可能となることから、社会全体での省エネルギー化が促進され、CO₂排出削減にも貢献することが期待されている。一方で、大量のデータ通信・処理が必要であり、導入される通信機器の数も莫大となることから、データ量あたりの消費電力の抜本的な改善がなければ、通信機器本体およびネットワーク部分でのエネルギー消費が大幅に増大することになる（コラム3参照）。ICTネットワーク機器および端末機器の電力削減、省エネルギー化は、持続可能なデジタル社会の実現のためには不可欠であり、2030年頃のBeyond 5G/6Gの実用化においては、データ通信量あたりの消費電力を現在の5Gの100分の1程度とするよう大幅な省エネルギー化が求められている。7Gにおいてはさらにデータ通信量が増加するため、データ通信量あたりの消費電力はさらなる低減が不可欠である。

無線・光融合基盤技術により次世代通信ネットワーク機器を低消費電力化・高効率化していくことは、爆発的に数が増大するネットワーク機器に関連する消費エネルギー増加の抑制に大きく貢献できる。その結果、持続可能な高度デジタル社会を実現できると考えられる。さらに、このようなネットワーク機器の普及により高度なエネルギーマネジメントが可能となり、社会システム全体としてのエネルギー消費量の削減、さらにはCO₂排出量の抑制・削減に寄与できる。

◆経済的効果

（クリティカルな応用分野などの新たな産業・市場の形成）

次世代通信とAIを適用したクラウドコンピューティングやエッジコンピューティングによって、リアルタイムかつインタラクティブ、さらに仮想空間も取り込んだ新たな通信サービスを実現できる社会インフラが期待される。これは、社会の中へ自律化（Autonomy）、自己組織化（Self-organized）、自動化（Automatic）の技術を浸透させることで、人的リソースが無くても、クリティカルな応用の実現する社会に繋がる。例えば、車を含むモビリティの自動運転、空飛ぶ車などの新たなモビリティの自動運転、これらの高度な交通システムの自動制御、モノ作り現場での遠隔の精密制御、遠隔の高度な手術などの医療サービス、世界規模の高度な金融システム、といったクリティカルな応用分野が創出され、自律的、自己組織的に高度化していくことが想定される。また、AR（Augmented Reality、拡張現実）、VR（Virtual Reality、仮想現実）、HTC（Holographic Type Communications）技術や触覚通信（Haptic Communications）などの新たな技術を駆使して、対面でなくても現実世界と同じ臨場感で自然な対人コミュニケーションを実現し、よりユーザーエクスペリエンスを向上させた人中心のサービスや、高いクオリティの教育環境の提供が実現される。これらは社会構造やライフスタイルの変革に繋がるものであり、経済的にも大きな価値を生み出すと期待される。

(産業競争力強化)

日本企業は現状では基地局、スマートフォンなどの世界市場で苦戦しているが、そこに組み込まれている電子部品の市場では世界シェアの約4割を占めており、要素技術の領域で潜在的な競争力を有している。したがって、今後も要素技術を起点として、低消費電力・高効率な無線デバイス・光デバイス、アンテナ制御技術、無線・光変換技術などの無線・光融合分野をコアとする研究開発を推進して、材料、半導体、電子部品の産業競争力強化および装置、通信システムの産業競争力の底上げに取り組むことが期待される。特に、これからテラヘルツギャップを埋める無線・光融合基盤技術が重要になってくるので、これを日本の産業的な強みの起点にして、電子部品とともに材料・素子・回路などの要素技術や装置産業の強化を進めることも可能になる。

また、最近注目されている半導体強化との関係では、半導体産業の復活を加速する一つの技術領域になると期待される。現状では高周波用の半導体市場は海外メーカーに占められているが、テラヘルツ波の集積回路の実現は最先端微細化プロセスによる現状技術の延長では困難である。このため、無線・光融合基盤技術による新たなヘテロ集積回路を早期に研究開発することで、半導体産業における新たな日本の強みにできると期待される。

さらに、無線・光融合基盤技術は、基地局やローカルネットワーク、エッジ間無線などの通信への利用だけでなく、コンピュータの光配線技術、光情報処理、車載レーダー・LiDAR、センシングなど幅広い分野への波及効果も大きい。産業応用に合わせた研究開発で各産業分野の技術力強化に繋がることが期待される。

(市場予測)

6Gの市場はまだ始まっておらず、通信各社、通信機器、スマートフォン、関連端末機器、半導体などの企業の多くは5G対応の開発に取組みつつ、6Gの研究開発を見据えている段階である。6Gは、通信インフラに止まらず、社会のライフラインとなるインフラ基盤を担うと想定され、そのアプリケーションとして、モバイル通信、衛星通信、ホログラフィック通信、IoT、コネクティッドモビリティ、製造、物流、医療、ヘルスケア、スマート農業・林業・水産業、建設、スマートシティ、スマートエネルギー、スマートビルディング、教育、環境、エンターテインメント、ツーリズム、公共安全などが考えられており、巨大な市場が形成されると期待される。特に、5Gで導入される超高信頼低遅延通信（URLCC：Ultra-Reliable and Low Latency Communications）やローカル5Gが発展して、多様な用途に適合したローカルな通信ネットワークの構築が進み、AIが主導する運用（Zero-Touch Operation）の変革、集中制御型（Orchestration）から分散協調型（Choreography）への運用の移行など、ネットワーク運用の自律化・知能化の進展によっても新たな市場形態が創出されていくと考えられる。

6G関連の世界市場規模としては、2035年までに約200兆円規模に達するという予測もある（出典：Global 6G Market Report 2021, <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/04/19/2212107/28124/en/Global-6G-Market-Report-2021-Market-to-Reach-1-773-09-Billion-by-2035.html>）。7G以降に対する市場予測はまだないが、新たなサービスの提供やこれまでの市場規模の推移から考えると6G以上の市場規模になることは想像に難くない。

また、これに関連するデバイス市場では、5G関連のデバイス世界市場規模として、2020年のメーカー出荷金額ベースで11兆889億円に対し、2030年には69兆5930億円と約6.3倍に拡大すると予測されている。ここで関連デバイスとして、回路、基板、主要部品、デバイス、材料、評価システムなどを対象としている（出典：MONOist（2020）, <https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2008/28/news017.html>）。7G以降のデバイス市場もさらに拡大していくものと考えられ、7G以降の通信技術のコアとなる無線・光融合基盤技術への期待は大きい。

2.3 科学技術上の効果

（新たな無線・光融合分野への展開）

コヒーレント光通信ではもともと無線通信で培われた知見、技術が大いに生かされている。また、光ビームの研究から見いだされた軌道角運動量を運ぶ光渦は、その概念がマイクロ波に拡張され、OAM波として次世代無線通信における大容量化を実現するための重要な手法として期待されている。このように、無線と光、それぞれの領域で得られた知見、開発されてきた技術の相互活用が情報通信技術の高度化を可能にしてきたといっても過言ではない。本プロポーザルが掲げる無線・光融合技術においては、これらの相互活用がさらに進むとともに、相互融合、一体化へと進むことが予想される。これにより、“テラヘルツギャップ”の克服が可能となり、通信技術の新しいパラダイムを拓くと期待される。その過程においては、電子技術（エレクトロニクス）と光技術（フォトリクス）を融合した技術（光電融合技術）、様々な機能を一つのチップで実現するための異種材料集積技術、それらを可能にする材料技術、実装技術、計測技術の深化が進むはずである。その深化は、情報通信技術に限らず多くの分野に波及し得るものであり、新たな基礎科学および基礎技術、応用の源泉となると考えられる。これらの基盤技術・基盤科学は、現在においても日本が得意とする領域である。長期的視点での研究支援、異分野研究者間の交流促進、広く長期的視点で方向性を示し得る人材の育成といった推進方策を有機的にリンクさせて進めることにより、これらの技術を無線・光融合技術、さらには次世代科学技術基盤として昇華させることができ、長期にわたって我が国の科学技術のプレゼンスを確保することができると考えられる。

（関連学術分野の発展）

無線・光融合技術の研究開発を進めることによって、関連するそれぞれの学術分野においても新たな発展が期待される。特に、これまでのテラヘルツ波の研究はイメージングや分析といった一部の研究者だけの研究領域であり、その他の研究領域の研究者からはあまり関心を持たれてこなかった。次世代無線通信という明確な応用分野が出てきたことにより、未踏の周波数領域へ挑戦していくことに関して皆が真剣に考え、大きな研究分野に発展する可能性がある。

無線通信分野では、これまでの性能向上の技術トレンドから、6Gにおいて伝送速度100Gbps、7Gにおいて1Tbps、周波数帯も300GHz帯以上の利用が必要になると考えられるが、これまでの高周波用の半導体デバイスなどをを用いたエレクトロニクス技術の高性能化や、これらを活用した通信方式の研究開発だけでは、ノイズや消費電力などの面で実現困難と考えられる。一方、光技術を用いると、200～400GHzのキャリア周波数を用いて100Gbpsの伝送速度を達成したものや200Gbpsを越えるものがすでに報告されており、テラヘルツ信号の発生や変調などの点ではエレクトロニクス技術よりも実現が容易と考えられる。このため、レーザーや光変調器などのフォトリクスデバイスや光回路を活用した新たなテラヘルツ波の発生・変調・増幅回路、テラヘルツ波の特長をうまく活用したり弱点を補強したりする新たな通信技術や通信方式などの研究開発に期待が集まる。

光通信分野および光技術分野においても新たな光デバイスや多重化手法などの研究への展開が考えられる。光技術を用いた位相安定性の高いテラヘルツ波の生成に期待が寄せられているが、そのためには周波数安定性が極めて高い光源が不可欠である。また光信号のテラヘルツでの高速変調を可能にする高速高効率光変調器、高速変調された光信号を受信する超広帯域光検出器などの開発も求められる。このようなデバイスの実現に向けて、新たな概念や技術の導入が進むと考えられ、結果として光デバイス技術における革新がもたされることが期待される。これらのデバイスは、光計測や量子技術など、多様な応用分野で活かされる。また、無線・光融合技術の研究で培われる集積化技術、実装技術の進展は、光回路技術のさらなる深化を可能にすると考えられる。さらに、無線・光融合技術において検討・活用が進むと期待される新たな変調方式や多

重化手法の概念は、将来の光通信技術へ応用展開されていくと考えられる。

材料分野では、テラヘルツ周波数領域において優れた特性を持つ材料の研究開発が進展していく。特に、低損失の導電材料、低誘電率で誘電正接（ $\tan \delta$ ）の小さな誘電体に対する要求は大きくなるため、新たな金属材料、有機材料、無機材料の研究開発が進展すると考えられる。また、ナノカーボン、トポロジカル絶縁体などに見られるテラヘルツ領域特有の物理現象の基礎研究が、新しい機能をもつデバイス開発に結びつくことも期待される。さらに、無線・光融合基盤技術の研究課題には、既存技術の単純な延長では実現困難な課題も含まれており、関連する様々な研究者が連携して基礎研究・材料研究が幅広く実施されると考えられる。例えば、半導体、誘電体、磁性体、金属などの材料分野の研究者は、現状では電気・電子系、物理系、光学系、化学系、金属系などの学会に分散しているが、無線・光融合技術に関する分野横断のワークショップやプロジェクトを通じて連携し、新分野が形成されることも期待できる。

情報処理分野では、MECなどの高速なネットワーク資源を活用した新たな形態のコンピューティングの研究や、それを使った新たなサービスに向けたハードウェアおよびソフトウェアの新たな研究領域が進展すると考えられる。また、IoE（Internet of Everything）によりヒトだけではなくモノやコト（データ）などがインターネットにつながった新たな社会の実現に向けた研究開発が加速される。「センシング」のネットワーク化が進化し、コミュニケーションを超えた新しい利用シーンとして、電波による「物理的な世界の可視化」や、サイバー世界での「デジタルツインの生成」などの技術が進展していく。6Gなどの次世代通信技術により、物理的な世界はサイバー世界と深く結びつき、メタバース（インターネット上で提供される仮想現実空間）にパラダイムシフトするような生活スタイルを生み出すとともに、100兆円規模の巨大経済圏（メタバース経済圏）が誕生すると予想されている。そこでは、AR、VR、MR（Mixed Reality、複合現実）などの仮想世界と現実を融合させた画像処理アプリケーションを通じて、極めて没入感の高い体験や多感覚的なインタラクションを可能とする技術がさらに進展していくと考えられる。また、次世代通信が活用されることが想定される革新的な製造、自律走行など、ロボットやドローン、新しいHMI（Human Machine Interface）のユビキタスでリアルタイムな利用を可能とする技術の研究開発が進展し、本格的なDXが加速される。

さらには、無線・光融合基盤技術は宇宙科学・宇宙化学や固体物理など他の学術分野の発展にも貢献できると考えられる。例えば、宇宙化学においては、宇宙における生命の起源を探るために、有機分子をはじめとする様々な分子のマイクロ波から赤外光に至るスペクトルデータを収集しているが、0.3THz～30THzのテラヘルツ・遠赤外領域におけるスペクトルデータが極端に少ない（これも「テラヘルツギャップ」と呼ばれている）。これは、感度が高く使いやすい計測機器が無かったためである。無線・光融合基盤技術の進展によりテラヘルツ帯の高品質の発振源、高感度な検出器・計測装置が開発・実用化されることにより、テラヘルツ領域のスペクトルデータの収集が容易になり、宇宙に存在する有機分子の全容がわかるようになり、生命の起源に対する理解も深まると期待される。また、固体物理において、テラヘルツ波は光子エネルギーが小さいので、固体を破壊せず高密度の光子を照射することができ、それに起因する様々な非線形現象が観測されているが、無線・光融合基盤技術の進展により小型で高強度のテラヘルツ発振器（テラヘルツ光源）が開発・実用化されれば、実験系の構成が容易になり、このような非線形現象の研究の進展が期待される。

3 | 具体的な研究開発課題

通信システムは、高度な材料・デバイス技術に支えられた無線、光通信技術に加えて、基地局や端末、さらにそれらを組み合わせたネットワーク技術などから成り立っている。現状の通信システムで、すでにネットワークの保守・運用技術も高度化・複雑化しており、さらに社会基盤としては通信の安全、つまりデータのセキュリティ、通信インフラとしての安全性の確保が不可欠である。将来、次世代通信システムが社会に向けて様々なサービスを提供するためには、SNSやEC（electronic commerce、電子商取引）、あるいは最近では、仮想（サイバー）空間と現実（フィジカル）空間を融合したサイバーフィジカルシステムとしてのプラットフォームが通信ネットワークの上に構築される。このような構造も含め、図3-1に次世代通信基盤技術の俯瞰図を示す。移動通信システムの運用に関わる上位レイヤーの基盤技術（ネットワークシミュレーション、ネットワーク仮想化・スライシング、ネットワークセキュリティなど）については、これまでの研究基盤上で継続的な研究開発を進めていくことが重要であり、すでに様々な取組（研究開発・プロジェクト）が実行されている。その一方で、下位の技術レイヤーであるハードウェア技術（図3-1の材料から実装・配線まで）に対する取組が十分になされているとは言い難い。

本プロポーザルにおいては、主にハードウェア技術に焦点を当て、未踏の周波数領域の利用、無線通信と光通信の高度利用に向けた、光技術、異種材料集積技術、テラヘルツ技術、メタマテリアル技術、材料技術など日本の強い科学技術をコアにした無線・光融合基盤技術の創出、およびネットワーク機器のCO₂削減、信頼性・強靱性向上やコンピュータネットワーク、レーダー、センサなどへの応用も考慮した通信デバイス・モジュールの低消費電力化、高信頼化、低価格化などの研究開発の課題について述べる。なお、この俯瞰図や以下の説明では主要な研究開発課題・技術を示しているが、これらに含まれていない技術やこれから出てくる技術についても研究開発課題の解決に貢献するものは研究開発に取組んでいく必要がある。

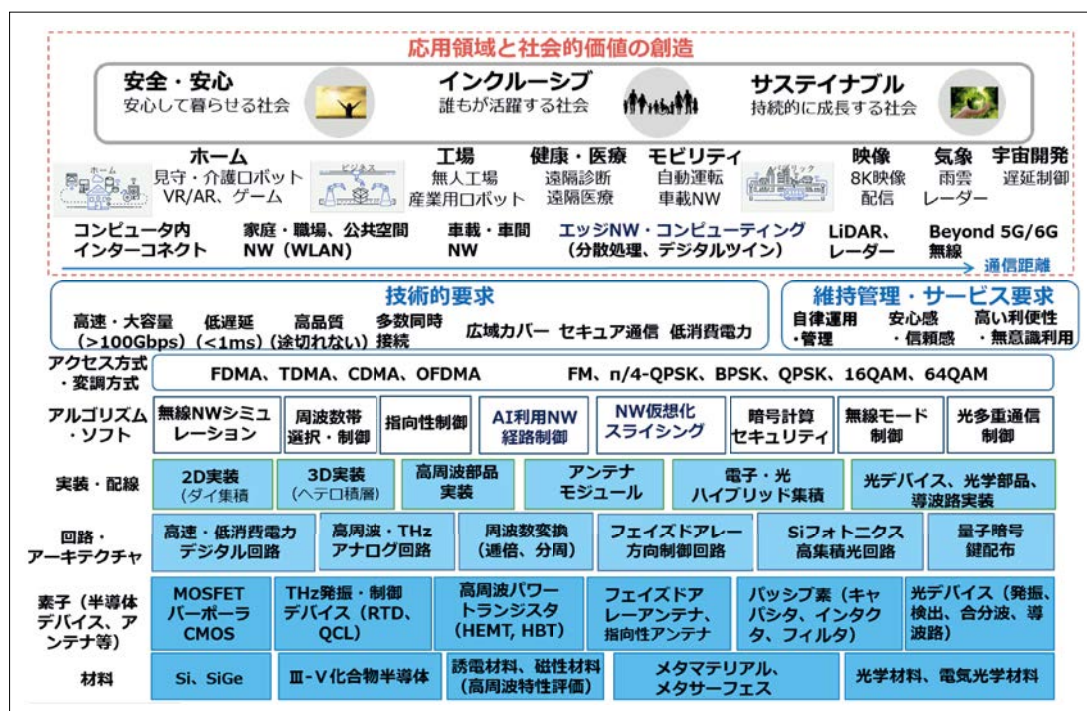


図3-1 次世代通信基盤技術の俯瞰図

3.1 未踏の周波数領域の利用に向けた研究開発

ここでは、無線周波数として100GHz（0.1THz）以上のテラヘルツ帯といった未踏の周波数領域の利用に向けた基盤技術の研究開発課題について述べる。未踏の周波数領域の利用に向けては、高精度なアンテナ指向性の制御、テラヘルツ波の反射・透過・集束の制御、高効率な発振・受信・変調デバイス・回路、低損失基板・構造、高精度な高周波材料特性評価などを実現する基盤技術が必要である。以下、未踏の周波数領域の利用に向けた技術課題について説明する。

（電波の反射・透過・集束の制御）

テラヘルツ波は直進性が強く大気による吸収が大きいので、電波を収束させたり、障害物を避けて迂回するために反射させたりして届けたい場所まで電波を誘導する技術が重要になる。光であれば、ガラスのレンズで集光したり金属板などで反射させたりすればよいが、テラヘルツ領域の電磁波の伝播を制御するための材料や素子で適当なものがない。レンズや偏光子を作製する際にこの周波数帯域で使用できる自然界に存在する材料が限られていることがその原因である。そのため、この周波数領域で屈折や反射などを制御するメタマテリアル・メタサーフェスといった微細構造を持った人工的な材料の研究開発が必要である。メタマテリアル・メタサーフェスは波長よりも小さな金属や誘電体の構造体により、誘電率や透磁率を変化させることで、屈折率などの電磁気学的特性を制御するものである。光領域から電波領域まで幅広く適用可能であり、近年は電波領域での実用化研究が進められている。すでに5G通信の28GHz帯では、メタマテリアル反射板を用いた5Gエリア拡大の実証実験が行われている。メタマテリアル反射板の設置によりスループットが1桁程度向上し、良好な5Gエリアが拡大した（出典：OPTRONICS Online 2018.12.4）。また、高屈折率・無反射のメタサーフェスを用いたレンズ・波長板・プリズムなどの研究開発が行われており、平面メタレンズと共鳴トンネルダイオード（RTD）を組み合わせることで、指向性の制御可能な6G用のテラヘルツ帯CW光源の製作がなされている（出典：フォトニクスニュース第7巻2号2021年p.55）。このような研究例はあるが、より波長の短いテラヘルツ波ではミリメートル以下の構造体の製作が不可欠であり、また金属そのものや金属と誘電体界面での凹凸による損失が増えてくるため、材料を含めたメタマテリアル・メタサーフェスの研究開発が重要である。また、静的な制御だけでなく、ダイナミックに電波の方向を変化できるような動的・アダプティブな電波伝搬制御が可能な技術の創出も期待される。

また、光の領域では「もどり光」として問題になっていたが、これまでの無線周波数ではあまり問題にならなかった「戻ってくる電波」の問題が顕在化することも考えられ、この対策としてアイソレータや回路的な対策が考えられる。アイソレータとしてはテラヘルツ領域の電磁波の偏光を制御するデバイスが必要であり、このためにも光領域におけるファラデー効果と同様な効果が期待されるメタマテリアルのようなデバイスの研究開発が期待される。

（高効率な発振・受信・変調デバイス・回路）

テラヘルツの周波数領域になると、新たな高周波用デバイスの研究開発だけでなく、高品質・高効率で発振・増幅・検出可能な高周波用回路の研究開発が不可欠である。

高周波用のデバイスとしてはシリコンや化合物半導体を用いたトランジスタ、ヘテロ接合トランジスタ・高移動度トランジスタ（HEMT）、バイポーラトランジスタ、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ（HBT）、ショットキーダイオード、共鳴トンネルダイオードなどが一般的に用いられているが、これらのデバイスは0.1～1THzの領域では、周波数が上がるにつれて効率が極端に低下するテラヘルツギャップ（コラム2参照）が報告されている。この領域での効率的な発振や変調、増幅を行うための高性能なデバイスの研究開発が不可欠である。特に、余裕を持った動作のためには、使う周波数の数倍程度の最大発振周波数（ f_{max} ）を有する

トランジスタが必要なため、その研究開発が求められる。シリコンのMOSFETはこれまで微細化により高性能化・高速動作が進んできたが、ゲート長が数十nmまで短くなると、寄生容量（設計意図に反して電荷を蓄えてしまう容量成分）などの影響で f_{max} は頭打ちになっており、SiGeチャネルや三次元構造（GAA：Gate-All-Around）のナノシートトランジスタなどの新たなチャネル材料・構造のトランジスタの開発が望まれる（コラム5参照）。また、高い移動度を持つ化合物半導体はシリコンよりも高周波動作に有利であるが、安定動作や信頼性向上のための結晶成長技術や保護膜技術、微細構造作製プロセスの向上によるHEMTやHBTの高性能化が望まれる。高周波の発振であれば、負性抵抗特性を有するダイオードも有望であり、GaAs系やInP系のヘテロ接合を用いた共鳴トンネルダイオードの高性能化も期待される。高出力の増幅デバイスとしては、固体素子よりも電力や大きさは大きくなってしまいが、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術を使った進行波管（TWT：Traveling Wave Tube）などの真空ナノエレクトロニクス的小型・低電力化の研究開発も期待される。さらに、この周波数帯域は光の周波数の下限の拡張ともとらえることができるため、レーザーダイオード、量子カスケードレーザーなど光領域のデバイスおよびその技術を利用することも可能と考えられる。特に、2波長中赤外光を発振し、さらにそれらの差周波発生によりテラヘルツ波発振までを1つの活性層内部で実現するテラヘルツ量子カスケードレーザーは、波長450 μm （周波数670GHz）までの長波長発振が室温条件で報告されており（出典：JST-CRDS俯瞰ワークショップ報告書「光技術の俯瞰～光技術の注目動向と日本の技術力強化の方向性～」CRDS-FY2019-WR-06）、今後のさらなる高出力化に向けた研究開発が期待される。

これらの高周波用の新たなデバイスやこれまでの高性能デバイスを活用した高効率な発振回路、増幅回路、変調回路、送信回路、受信回路などの研究開発も進めていく必要がある。特にCMOSデジタル回路のベースバンド部やアンテナ部との高い整合性を考慮したテラヘルツ領域までの高周波回路技術の研究開発が望まれる。具体的には、アウトフェーシング増幅器など高効率な電力増幅器、低雑音増幅器、低消費電力・超高速・高精度のA/D変換回路・D/A変換回路技術などが挙げられる（出典：“Power Amplifiers Performance Survey 2000–Present”：https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.htm、“ADC Performance Survey 1997–2021”：<https://web.stanford.edu/~murmman/adcsurvey.htm>）。また、光ファイバ無線（RoF：Radio over Fiber）やビームフォーミング制御用のアナログ回路技術、負性抵抗素子を用いた高効率な発振回路、発振領域における注入同期（引き込み現象）による増幅作用を持つ高感度な受信回路、位相雑音の大幅な低減を可能とする光領域の周波数からの分周技術などもある。特に、低雑音で雑音耐性に強い発振源は通信品質向上のためだけでなく、高度な多重化による大容量通信にとっても重要となってくる。従来のエレクトロニクスによる発振と逡倍による高周波発生では位相雑音が増大してしまう、という問題を解決するために、光領域の周波数からの分周による小型で高安定・高品質・高効率の発振源の研究開発が期待される。また、高い周波数安定性を実現できる光周波数コムを活用したテラヘルツ光源の開発も期待される。周波数コムを活用することで、光格子時計や原子時計の有する高精度な時間（周波数）基準をテラヘルツ領域に分配・活用できるようになるため、次世代通信において期待される基地局間や端末間の超高精度時間同期が可能となる。非線形光学結晶を用いた波長変換や光伝導アンテナを用いた光コムからテラヘルツ領域の周波数コム（テラヘルツコム）生成（例えば Appl. Phys. Lett. 88, 241104 (2006)）などが報告されているが、今後は微小共振器や量子カスケードレーズなどを用いた、小型で高安定なオンチップのテラヘルツコム発生器の実現（例えば Appl. Phys. Lett. 114, 150401 (2019)）が期待される。

（高周波用低損失基板材料）

周波数が高くなってくると、配線や基板なども分布定数回路の一部として扱う必要があるとともに、金属の表皮効果が顕著になって導体損失が増え（周波数の平方根に比例して電気抵抗が増加）、絶縁基板の誘電損失も増加する。このため、導体損失や誘電損失の少ない（誘電正接が低い）材料の探索が重要になる。また、金属導体と絶縁基板との界面の凹凸が導体損失を増大させるため、例えば0.1THzでは界面の凹凸をサブミ

クロンレベルまで低減させることが望まれ、界面の接着性を保ちながら導体損失を抑える導体形成技術（加工・成膜プロセス技術、高平滑に金属と誘電体を接合する表面処理技術など）への挑戦が期待される。

絶縁基板材料としては、伝送損失を減らすために誘電正接が低い有機高分子材料（例えばポリフェニレンエーテル（PPE）樹脂、ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）樹脂）が用いられている。高分子材料の1GHz以下の周波数での誘電損失は、分極が高周波に追従できなくなるために誘電正接（ $\tan \delta$ ）が生じることによるが、10GHzから1THzの周波数帯での誘電損失は結晶域内の格子振動や非晶域内の分子鎖の運動に起因する吸収で生じるため、これらの低減が重要となる。研究開発の一例としては、不純物や結晶欠陥などを減らすことで誘電損失を下げる試みが行われている（出典：富川真佐夫：工業材料69巻5号p.54, 中川幸一：高分子27巻2号p.97）。

（高精度な高周波材料特性評価手法）

ミリ波からテラヘルツ波といった高周波数領域の新規利用に向けては、高周波の電子回路の素子や部品だけでなくその周辺にある絶縁基板や電源ラインなども高周波の発振・増幅・伝搬に影響してくるため、それらの高周波特性のパラメータを正確に把握し、高周波回路の設計や高精度電磁界シミュレーションに反映していくことが重要である。材料特性パラメータとしては、導電率、誘電率、透磁率、導体損失、誘電損失などがあり、テンソル成分（異方性、非対角項を含む）や非線形パラメータも含めた高精度な測定が求められる。このため、絶縁基板や半導体デバイスなどの素子、伝送路（導波路）に使用される誘電体・導体材料、電波・光変換に利用される非線形光学材料、磁気光学材料などの高周波特性評価技術の研究開発が不可欠である。

低損失バルク材料の複素誘電率や導電率の計測には、基底モードを活用する共振器法を用いた手法が技術的に確立されている。しかし、高周波数領域になると共振器やサンプルのサイズが小さくなるため、100GHzを超える周波数領域では共振器やサンプルの加工精度の問題により高精度計測が難しくなる。したがって、100GHz超の周波数領域で精度よく計測できる手法の確立が求められる。このような要求に対し、例えば、高次モード励振を活用する共振器法（平衡型円板共振器法）などの新たな手法が出てきている（JST-CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ報告書「次世代通信技術の高度化に向けた無線・光融合基盤技術」CRDS-FY2021-WR-07）の「4.5 高周波材料特性評価技術」。

これらの高周波材料特性の新たな計測技術に関しては、計測装置としての研究開発も重要である。高周波特性測定用のネットワークアナライザなどの計測機器は海外のメーカーに市場を取られている状況であるが、材料評価技術でリードしている日本としては、材料評価装置の開発で先行できるチャンスである。

（低損失導波路技術）

高周波数の電磁波を回路中やチップ上で効率良く伝送するためには、低損失な導波路技術の確立が必須である。これまで、高周波帯電磁波の伝送には、導波管やマイクロストリップラインなど、金属を用いた構造が主流であった。一方、用いる電磁波の高周波化に伴い、金属自体による損失や金属と基板の界面の微細な凹凸に起因する損失が増大することから、光導波路のように誘電体を基礎とした高周波数帯における新たな導波路技術の開拓が求められており、いくつかの先駆的成果が報告され始めている。例えば、光領域で進展してきたフォトニック結晶技術をテラヘルツ領域に展開し、高抵抗シリコンを用いて0.3THz帯で伝搬損失が0.1～0.2dB/cm以下の低損失フォトニック結晶導波路が実現されている（K. Tsuruda et al., Opt. Express 23, 31977 (2015)）。また、近年注目を集めているトポロジカルフォトンクス概念を活用したトポロジカルテラヘルツチップも報告されている（Y. Yang et al., Nat. Photon. 14, 446 (2020)）。トポロジカルテラヘルツチップは、トポロジカルエッジ状態を用いたテラヘルツ伝送回路であり、回路形成に必要な導波路曲げに伴う散乱損失を抑制することができる。その他にも、シリコンフォトンクスの基本構造であるシリコン細線導波路と集積化した導波路型回折格子（D. Headland et al., Optica 8, 621 (2021)）などが報告されており、誘電体をベースとした高周波導波路、回路技術を進展させていくことが望まれる。

光の導波路の一つの方法として金属表面のプラズモンを利用したプラズモニック導波路技術があり、波長以下の幅の導波路に光を閉じ込めて伝搬させる技術が研究開発されている。これをミリ波・テラヘルツ波の伝搬にも適用して、集積回路全体の小型化・低価格化を図ることも重要な研究開発課題である。先行的に研究されている光領域においてもまだ基本的な研究開発の段階であり、低損失伝搬の材料・構造や他の導波路との高効率の変換方法が課題となっており、これらの光領域の研究とも連携していくことが望まれる

3.2 無線通信と光通信の高度利用に向けた研究開発

上で述べた未踏の周波数帯への展開を図る技術の研究開発とともに、限られた周波数帯域の中で、各種の多重化技術によりさらなる高速・大容量化を実現する技術開発が必要である。また、自動車やIoTセンサなど多数の端末が同時に接続できる超多数同時接続技術、リアルタイム制御を可能とする超低遅延で安定して情報を送受信する技術、無線と光通信の相互変換、アナログとデジタルの相互変換を効率的に行う技術などの研究開発にも取り組む。これらは、システムの視点からソフトウェア技術の役割が大きくなるため、ソフトウェアとの連携を考慮した研究開発が望まれる。

(多重化技術)

周波数利用効率の向上に向けては、無線分野では電波資源を有効に活用するために多値QAM (Quadrature Amplitude Modulation: 直交振幅変調) 方式などの高効率符号化技術が開発された。また、携帯電話システムの実現に際しては、多くの利用者が同時に通信サービスを楽しむように、基地局を中心にセルを構成するシステム方式から始まり、周波数多重化、時分割多重化、符号分割多重化、直交周波数分割多重化、MIMO 多重化などの無線多重化技術を組み合わせ、複雑だが周波数利用効率の高い無線方式が標準化されて導入されてきた。今後は、これまでの数百 MHz から数 GHz (マイクロ波) の周波数領域に加え、先に述べた未踏の周波数領域も含めて電波の高効率利用に関する研究開発が重要である。具体的には、以下のような研究開発課題がある。

- (A) MIMO ビームフォーミング技術のさらなる発展と、高周波帯への展開
- (B) 超高周波無線での 1024/4096QAM/OFDM を導入可能とする線形回路構成技術
- (C) 光ファイバ無線 (RoF) システムの活用
- (D) 新たな多重化方式の導入 (OAM などの量子技術の導入)

(A) の MIMO 技術については、最近の第 4 世代・第 5 世代において OFDM との組み合わせが周波数利用効率を向上させ、大容量化に大きく寄与した。さらに、単純な複数送信アンテナと複数受信アンテナとが複数伝送路を構成する高速通信技術から、基地局から利用者がいる複数の地点へ複数の無線ビームを向けて通信するビームフォーミング技術へと進化を開始し、その発展は Beyond 5G 以降も超多数同時接続を実現するための重要な研究開発課題となっている。この MIMO 通信技術はアダプティブアレイアンテナ技術や Massive MIMO 技術とも呼ばれるが、従来の携帯電話方式が無指向性の電波により広い範囲の利用者との通信を可能にするものであったのに対して、進化したこの技術では、利用者の動きに追従してポイントツーポイント型の光ビームのように干渉しない無線ビーム通信を可能にする。これは周波数領域からみて、光通信のような無線通信技術になっていくという点で、「無線・光融合」の大事な側面でもある。この MIMO 技術をテラヘルツ帯に適用していく場合には、以下のような複数で困難な問題が待ち構えており、これらの問題を解決する研究開発が必要である。

- 1) ビーム発生のために多素子アンテナが必要であり、ベースバンド処理の計算量が膨大となる。現在、デ

デジタルビームフォーミング／ハイブリッドビームフォーミングなどの方式が検討されているが、原理的に複数アンテナ間を非相関化するアンテナ技術とその信号処理の双方を組み合わせた検討が望まれる。

- 2) そのアンテナの寸法は高周波数化に伴って短くなり、ミリメートル程度とチップと同程度まで小さくなる。このため、半導体チップと一体化して実装する方向性も重要である。
- 3) 高い周波数での信号処理には半導体デバイスのさらなる高速動作が必須である。
- 4) 実環境での回折や反射を考慮した高周波の電波伝搬について知見が存在していない。

(B) の線形回路構成技術については、これまでの携帯電話方式においては256QAMまでが仕様化され、携帯電話以外（Wi-Fiなど）では1024QAM、4096QAM、16384QAMが仕様化されている。しかし、テラヘルツ帯で多値QAMを実現していく上では、高周波数領域での大出力アンプや、A/D変換器の線形性が多値化のボトルネックになると想定される。歪みを補償する回路技術、ピーク信号の発生を小さく抑える技術などが重要な研究開発課題となる。

コラム4

MIMO 技術

MIMO技術はBeyond 5G以降も継続して発展していくと考えられているが、特にビームフォーミング技術はミリ波帯、テラヘルツ帯においても、①伝搬損失が大きくなる高周波帯において信号の強度を強めてセルの通信範囲をある程度確保する技術、②多数ユーザー間の無線の干渉を減少させることにより同時接続数を増加させ基地局あたりのトータルな伝送帯域を増加させる技術、として重要である。

無線信号の伝搬損失は以下のフリスの伝搬公式から決まり、アンテナ利得が一定の場合、キャリア周波数が高くなる（波長 λ が短くなる）につれ受信電力 P_r が減少する。

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r$$

(P_t : 送信電力、 P_r : 受信電力、 λ : 波長、 d : 距離、 G_t : 送信アンテナ利得、 G_r : 受信アンテナ利得)

しかし、ビームフォーミングを行えば、高周波化しても同面積の多素子アレイアンテナで同程度の到達距離を実現できる。また、各ユーザーに異なるビームを割り当てることにより、基地局あたりの同時接続数を増加させることができる。このように同時接続数を増加させる方式は、Massive MIMOと呼ばれている。（出典：須山等，“5G マルチアンテナ技術”. NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル Vol.23, No4 (2016)）

MIMOは、複数の送信アンテナと受信アンテナ間の伝送路を固有値分解により非相関化させ、複数の固有モード伝送を可能とする方式である。非相関化は通常プリコード処理によって行われるが、アンテナ形状によっても実現可能である。

MIMOシステムのチャネル容量 C_{MIMO} は、以下の式で近似される。

$$C_{MIMO} = N_T \log_2 \left(1 + \frac{P N_R}{N_T \sigma^2} \right)$$

(N_T : 送信アンテナ数、 N_R : 受信アンテナ数、 P : 送信電力、 σ^2 : 熱雑音)

この式からわかるように、チャネル容量は送信アンテナ数に比例して増加する。例えば、送信アンテナ数50程度でチャネル容量は100となる。これは100MHzの帯域幅があれば10Gbpsのスループットの通信が可能であることを意味する。将来4GHzの帯域幅が確保されれば、400Gbpsの大容量無線システムを構築できる可能性がある。

MIMO技術は、基地局と端末間のみならず、基地局を構成するRUとDU間、すなわちフロントホールと呼ばれる部分にも適用可能である。もちろん、距離が長い場合は無線ではなく、RoFが適用される場合もある。

(C) のRoFはその名の通り、無線アナログ信号を光ファイバ上に通す通信技術であり、以前から存在している。最近では基地局の構成において、電波を送信するRU (Radio Unit) を、DU (Data Unit) やCU (Control Unit) から分離して、両者の間をRoF技術で結ぶ方式が一般化されつつある。ビームフォーミング用に多素子アンテナを使用する最新の技術においては、多素子アンテナ毎にRoF技術を適用する傾向がある。つまり、DUやCUの機能は束ねて配置することにメリットがあるのに対して、RUはセルを構成する地点に分散して設置されるため、両者の距離が離れるのが通常である。両者の間はフロントホールと呼ばれ、距離が離れる場合は、光によるRoF技術を活用するのが適当である。この場合RoF上の無線信号は、A/D変換器やD/A変換器を介することなく直接光信号から無線信号に変換されてユーザーに送信されるため、効率的に光に高周波無線信号を載せる変調技術や、光から高周波無線信号を取り出す復調技術の研究開発が重要になる。RoFの利用にあたっては、通信ネットワークの基本構造における光技術と無線技術の最適な分担が要になるため、システム技術とデバイス技術の双方の発展の中で、利用形態の新展開が模索されるものと考えられる。

(D) の新たな多重化技術の導入における一つの例がOAM多重化であり、軌道角運動量毎に信号を直交させて通信できれば、従来の多重化技術とも組み合わせで多重度を増加させることができる。既に複数の研究機関で研究が開始されており、今後の研究開発と実用化が期待されている。この技術の基になったのは、光分野で「光渦」と呼ばれて研究が進められている現象であり、これが無線分野に波及していったものである。したがって、従来の無線技術者、光技術者、システム技術者の垣根を越えた取組が必要な技術分野である。

(超低遅延・低ジッタ通信技術)

超低遅延・低ジッタ通信は、E2E (End to End) で常時安定してタイムラグを体感させない応答性能や超高精度の遠隔制御を担保するものであり、通信ネットワークの重要な指標の一つである。2030年以降では、伝送遅延は数ミリ秒程度 (広域展開)、0.1ミリ秒程度 (地域限定)、端末間ジッタは10ピコ秒程度が目標とされている。(出典: 総務省, Beyond 5G時代の有線ネットワーク検討会 取りまとめ概要 (2020)、https://www.soumu.go.jp/main_content/000675072.pdf)

一般に、通信ネットワークの遅延は、伝播遅延 (Propagation Delay)、処理遅延 (Processing Delay)、キューイング遅延 (Queuing Delay)、シリアル化遅延 (Serialization Delay) に分けられる。伝播遅延は、

信号が光、電気として媒体中を物理伝播することによる遅延、処理遅延は、ルータ、スイッチなどのネットワーク機器に入った光信号の処理による遅延、キューイング遅延は、ネットワーク機器でパケット信号の一部をバッファとして保持することによる遅延、シリアル化遅延は、パケット信号をビット毎に光信号として順次送信することによる遅延である。さらに、ネットワーク全体での端末間の遅延の変動（ずれ）であるジッタがある。通信ネットワークの遅延は、世代毎に通信規模や通信情報量に対する通信システムの全体最適化の結果として、各世代で低減されてきている。

今後は社会の情報処理機能がコア領域にあるクラウドコンピューティングからユーザー端末に近いエッジコンピューティングへと分散していくことが想定され、これに伴う低遅延化が進むと見られる。これを踏まえた超低遅延・低ジッタ通信に対する研究開発課題としては、ネットワーク処理の低遅延化技術、シームレスな伝送メディア変換技術、ネットワーク内コンピューティング技術、高精度時刻同期技術が挙げられる。

ネットワーク処理の低遅延化技術は、エッジ領域を主体に通信ネットワーク全体でパケット処理の遅延を低減させるもので、ハードウェア処理とソフトウェア処理の連携の最適化が課題となる。処理機能をエッジ領域へ分散させることで全体の遅延を低減させるネットワーク仮想化技術（Network Function Virtualization）や、通信処理高速化のアクセラレータとなるパケット処理専用のプロセッサ技術が研究開発課題となる。

シームレスな伝送メディア変換技術は、伝送メディアの光、電気、電波の相互変換を行う技術であり、光電変換やデジタルアナログ変換の抜本的な効率向上が求められる。光回路とCMOS回路のそれぞれが得意とする信号処理の構成を最適化することが課題となる。CMOSの微細化に伴い派生するリーク電流や配線抵抗増加に起因するCMOS回路の応答速度制限を回避する手段として、小型のEO/OE（Electrical-Optical/Optical/Electrical）変換を実装した光電子融合技術やフォトリソニック結晶を使った光トランジスタによる光回路の導入などによる変換技術の最適化が検討されており、フォトリソニック結晶やプラズモンなどの量子・ナノ技術による光電変換素子技術とその集積化技術および変換の最適化技術が研究開発課題となる。

ネットワーク内コンピューティング技術は、エッジまでのネットワークの区間毎の遅延配分を最適化することでE2E全体での超低遅延化を行う技術である。通信処理上の機能をネットワーク内に柔軟に配置できるようにして、伝送情報やネットワーク負荷状況等に応じて機能や通信経路を自動選択するリコンフィギュラブル（再構成可能）な全体ネットワークの最適化を行うものである。5Gから導入される超高信頼低遅延通信（URLCC:Ultra-Reliable and Low Latency Communications）は、6G以降の超高密度通信においては、さらに膨大となる無線端末数に対応し、その通信状況の把握と通信品質の最適化を行うことが求められる。近年のOFDMやMIMOの普及により、Wi-Fiなどで使われていたチャネル状態情報（CSI:Channel State Information）を利用することが可能となっており、これを活用して通信環境や通信システム負荷の把握を行い、状況に応じた通信経路などのリコンフィギュラブルな最適化が検討されている。膨大なCSIの取得と活用は通信システムとしてコスト高になる可能性も高く、AI技術を活用した最適な制御システムや、適時最適な電波送信を可能にするビームフォーミング技術も重要な研究開発課題となる。

高精度時刻同期技術の研究開発も行う。この技術は、通信デバイスの処理を同期させることで端末間を高精度に協調制御することで超低遅延通信を可能とするものである。6G以降では多数のアンテナ局が配置されるが、アンテナ局同士を時刻同期させることで、より超低遅延のサービスの可能性を拡げることができる。ただし、光速の制限による物理遅延が存在するため、0.1ミリ秒以下の超低遅延通信の実現には伝送距離は数10km程度が限界となっており、対象エリアは限定される（出典：山中直明,他（2021）電子情報通信学会論文誌B Vol.J104-B No.3 pp.315-336,https://search.ieice.org/bin/pdf_link.php?category=B&lang=J&year=2021&fname=j104-b_3_315&abst=）。また、現在、IoTセンシングにおいては、取得されるデータに対してタイムスタンプ情報を加え、時系列データのAI処理などに利用されているが、高精度時刻同期が実現されれば、タイムスタンプ情報の簡素化やそのアプリケーションシステム自体の簡素化も可能になる。

(超小型原子時計によるネットワーク同期の高度化)

次世代通信網においては、様々なアプリケーションにおいて、時刻同期の高精度化に対する要求が高まることが想定されており、小型で高精度な原子時計などの研究開発が重要である。基地局間の超高精度な時刻同期においては、例えば搬送波の周期の100分の一から1000分の一の時間精度以上での同期が可能になると、異なる場所に設置された複数の基地局アンテナから1つの端末に向けて位相調整された無線信号を送信し、基地局送信アンテナ間の非相関性を高めたMassive MIMO方式を実現できる可能性がある。搬送波周波数1THzを想定すると、 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ 以上の時間精度が必要となり、この実現には、我が国発の技術である光格子時計の活用が考えられる。すでに国内の複数機関に設置された光格子時計の同期実験、時刻比較実験などが行われており（NTTプレスリリース：超高精度光周波数の240kmファイバ伝送に成功）基盤技術は確立されつつある。今後、実環境下での長期間運用などの実証試験の進展が期待される。また、より精度の高い位置情報の提供・活用のためには、端末もしくはそれ以下のレベルにおいても、時刻同期の需要は益々高まるものと考えられる。端末間の時刻同期には、超小型原子時計の活用が検討されている。国内では、集積型原子時計の開発（AIST プレスリリース：非常に安定した手のひらサイズの小型原子時計を開発）が進んでいるほか、MEMS技術を用いた小型原子時計が報告されており（NICT プレスリリース：原子時計をスマートフォンに搭載できるくらいの超小型システムへ）、 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ の精度が得られている。今後、さらなる小型化、高安定化の実現が期待される。AISTの集積型原子時計では半導体レーザー技術（VCSEL）が活用されており、その安定化、長寿命化、低消費電力化などフォトニクス技術のさらなる進展も、ネットワークの高精度時刻同期とそれが可能にする高度な電波利用を実現するためには重要となる。これらの時刻同期技術の進展により、広域時刻同期が可能となり、現在では想定できない新たな利活用の形態が生まれることも期待される。また、量子技術の一つである光格子時計が広く通信技術に利用されるようになれば、それをきっかけに関連量子技術開発の加速も期待できる。

3.3 低消費電力化・高信頼化・低価格化に向けた研究開発

上記の次世代通信技術の基盤技術を通信システムに適用し、ネットワーク機器のCO₂削減や社会インフラとしての信頼性・強靱性の向上といった社会的な要請に応え、さらに次世代通信だけでなく、データセンターやエッジコンピューティングなどのコンピュータネットワーク、レーダーシステム、IoTセンサなどの応用分野に利用していくためには、低消費電力化・高信頼化・低価格化などの視点での研究開発も必要である。具体的には、光デバイス、CMOSデジタル回路、高周波アナログ回路、アンテナなど異なる材料・デバイスを一体化するハイブリッド集積化およびモジュール化技術、低損失の高周波伝送路、光導波路技術、熱の集中を避けたり効率的に放熱したりする熱制御技術などに取組む。

(低消費電力素子)

通信用の高速な信号処理に用いられるA/D変換・D/A変換においては、高速化とともに低消費電力化を進めることが重要になる。現状では、シリコン半導体による高速A/D変換回路で、変換周波数100GHzにおけるデータ変換あたりの消費電力の最小値として200fJ程度が報告されている（ADC Survey：<https://web.stanford.edu/~murmman/adcsurvey.html>）。今後、シリコン半導体素子の微細化技術およびデジタルアシスト回路技術により、少なくとも一桁以上の低消費電力化が望まれる。最先端のシリコン半導体素子（ナノシート型：IEEE Access Vol. 8, 2020 (189395)）では、最大発振周波数（fmax）が400GHzとなることがシミュレーションにより予測されており、少なくとも、140GHz帯までは、高出力用アンプを除くRF回路は最先端シリコン集積回路での対応が期待され、さらなる性能向上と低消費電力化の両立に向けた研究

開発が必要である。

(ハイブリッド集積化)

システムの小型化・軽量化・低価格化・低消費電力化には様々な素子・部品を集積して1つのチップ・パッケージにすることが有効である。ベースバンドのデジタル回路は今後も先端のCMOS技術により高集積化や電源電圧の低減による低消費電力化を進めていくことが望ましい。一方、高周波アナログ回路は低電圧化が必ずしも低電力化に結びつかないので、ノイズを抑えながら消費電力の低減が可能となる新たな回路技術の研究開発を進めていくことが望まれる。また、テラヘルツ波用の高周波回路やアンテナなどは通常のシリコン集積回路以外の材料が用いられることも多くなるため、これらの異種材料をCMOSチップ上に集積する技術(ヘテロ集積技術)、さらに、光通信機能まで含めて集積化して無線・光融合機能集積を実現するために、異なる機能・材料のチップを二次元的あるいは三次元的に集積化するハイブリッド集積技術に取り組むべきである。このハイブリッド集積技術においては、10 μ mピッチ以下の微細金属(Cu)電極の直接接合技術により、機能の異なる複数のチップを三次元接続する3D-chipletと呼ばれる技術への期待が大きい。

これまでも、ヘテロエピタキシャル技術により異種材料をシリコン基板上に形成して異種材料のモノリシック集積回路を作製したり、ウェハボンディング技術により異種材料基板や異種材料チップを接着させたりして集積化する技術の研究開発が行われてきた。今後はこれの高度化とともに、光導波路や高周波伝送路、アンテナまでも含められるように、低損失の接続部の構造や材料も考慮したハイブリッド集積技術の研究開発が重要になってくる。

(サブシステムのモジュール化)

通信に関わるハードウェアの高速化・低消費電力化を図る上では、個別のデバイスや回路だけの検討だけでは不十分であり、光トランシーバー、デジタルベースバンド、高周波送受信回路、アンテナ制御回路などある程度の規模のサブシステムを考えたモジュール化までの研究開発が必要である。特に他のモジュールとのインターフェース(例えば、電圧レベル、動作周波数など)をどのように設計するかでモジュールで使うデバイスや回路も異なる。したがって、材料・デバイス・回路の研究開発の早い段階から、モジュール構成についても検討を進めることが重要である。一例として、低誘電率・低損失の有機樹脂を介し、MIMOに対応した複数の微小アンテナを実装したシステムモジュールの研究開発も活発化してきている(2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), DOI: 10.1109/ECTC32862.2020.00031)。その実用化には、高周波デバイス、電磁界回路、通信制御を掌るデジタルベースバンドを含めたロジック半導体集積回路を包含するCAD設計プラットフォームを研究開発していくことも極めて重要となる(2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), DOI: 10.1109/ECTC32862.2020.00269)。

(半導体デバイスのサーマルマネジメント)

半導体デバイスなどからの発熱の問題に対処する放熱技術の研究開発が重要である。通信の高速化・大容量化や通信機器の小型化、デバイスの集積化などに伴い、半導体デバイスや集積回路の電流密度が増大し、集積回路や通信モジュール、通信機器における発熱の問題が顕在化している。今後のミリ波やテラヘルツ波になると、さらにデバイスの電力付加効率が低下することなどで、さらに発熱の問題が深刻になると考えられる。このため、それぞれのデバイスや集積回路の低消費電力化・高効率化を図ると共に、積極的に熱を逃がす材料や構造を導入して熱の流れを制御する熱マネジメントの研究開発にも取り組む必要がある。ヘテロ集積回路のチップの基板を薄くして裏面にSiCやAlNなどの高熱伝導半導体基板を貼り付ける技術や、新たな高熱伝導のTIM(Thermal Interface Material)材料、小型・高効率のヒートパイプやチップへの液冷機構などの技術開発が望まれる。ただし、高熱伝導材料やヒートパイプなどの構造は高周波伝送や損失にも影

響を与えるので、単独での熱設計ではなく、高周波回路設計とも連携した設計を行うことが期待される。

3.4 技術進化を支える基礎科学・材料研究

3章でこれまで述べてきた研究開発においては、既存技術の単純な延長では実現困難な課題も含まれる。また、今後もますます高まる通信技術高性能化の要求に応えるためには、現時点では想像もつかない新材料や新原理、革新技術の出現が必須である。これら新しいパラダイムを拓くシーズとなるのは、広く様々な分野で長期にわたり育まれる基礎研究であり、中長期的視点で様々な分野の基礎研究を深掘りすることは重要である。以下では、将来の無線・光融合技術の対象となりえる基礎科学・材料研究のいくつかの例について説明する。ただし、これらはあくまで現時点で想像し得るものに限っている。現状では通信技術に少しは関係すると思われる技術シーズも、充実した基礎研究の推進により、通信技術の不連続なジャンプを産む技術に繋がることもあり、そのような研究も期待したい。

(エマージング材料科学およびテラヘルツ物性の探求)

グラフェンを用いたテラヘルツレーザーの可能性、トポロジカル物質におけるテラヘルツ領域の巨大光学応答、反強磁性体のテラヘルツスピン応答など、近年出現した新たな物質群が、テラヘルツ領域の電磁波において多くの興味深い現象を示すことが明らかになってきた（例えばテラヘルツ波の増幅：S. Boubanga-Tombet, et al., "Room temperature amplification of terahertz radiation by grating-gate graphene structures," Phys. Rev. X, vol.10, 2020.）。これらテラヘルツ領域での電磁波に対して高い応答性を示す新材料の開発は重要な基礎研究の一領域である。また、日本が得意とする分光技術を活かしてその物性を深く理解することにより、新奇テラヘルツ光源や超高効率高速変調器などのデバイス応用の可能性が見えてくる。反強磁性体材料のスピン高速応答性などは、実現が期待されるテラヘルツ帯アイソレータなどに活用できる可能性を秘めている。

(ポラリトンの物理とその活用)

テラヘルツ領域は格子振動の周波数とも対応し、材料中で電磁波と格子振動が結合したフォノンポラリトンと呼ばれる連成波を形成する。このポラリトンを新たに情報や熱の媒体と考え、その原理を探求することなども興味深い対象である。例えば、表面フォノンポラリトンを使うことで、熱伝導を効率化できることなどが報告されており、将来の通信用集積チップで問題になると考えられる熱マネジメントへの適用が期待される（Y. Wu et al., "Enhanced thermal conduction by surface phonon-polaritons", Sci. Adv., 6 (40), eabb4461, 2020）。また、ポラリトンギャップでの遷移を活用した新たな光源技術などが出現する可能性もある。

(電磁波が持つトポロジカルな性質の追求と応用)

光渦は軌道運動量を運ぶ電磁波ビームであるが、その波面は螺旋状になっており、トポロジカルチャージと呼ばれるトポロジカルな指標で規定される。このように電磁波の位相や偏光、振幅などの空間分布が示す様々なトポロジカルな性質が、基礎科学の観点から近年大きな注目を集めている。また、異なるトポロジカルチャージを持つ光渦は異なる伝送チャネルとして利用できることから、通信容量の増大を可能にすると考えられており、工学的観点でも関心が高まっている（例えば、光学 42 巻 12 号（2013）総合報告（光渦・偏光渦が生み出す新応用）、尾松孝茂、「トポロジカル光波とその広がる可能性」、pp. 586-596.）。しかし、電磁波が示すトポロジカルな性質はまだ十分には解明されていない。今後、その全容を明らかにすることにより、

電磁波に対するより深い理解が提供されるとともに、新たな多重化通信の可能性が生まれることが期待される。また、通信に限らず、計測やイメージングなどへの波及効果も期待できる。

以上、具体的な研究開発課題として3-1節から3-4節まで無線・光融合基盤技術に関する4つの課題領域について説明した。これらの課題を解決するための重要な基盤技術の代表的なものを図3-2に示す。縦軸は周波数軸、横軸はそれぞれの領域の時間的な発展をイメージしており、左下の無線通信技術と左上の光通信技術の領域が拡大していき、ミリ波からテラヘルツ波になると両技術が交わってくることを示している。その交わった領域は技術的な融合によりこれまで難しかったテラヘルツギャップの克服に向けた新たな技術の創出が期待されるところであり、その具体的な技術のキーワードを赤い文字で記載している。先にも述べたが、この図に示されていない新たな技術・キーワードが今後現れることもあり、研究開発課題の解決に貢献するものについては積極的に取組んでいく必要がある。

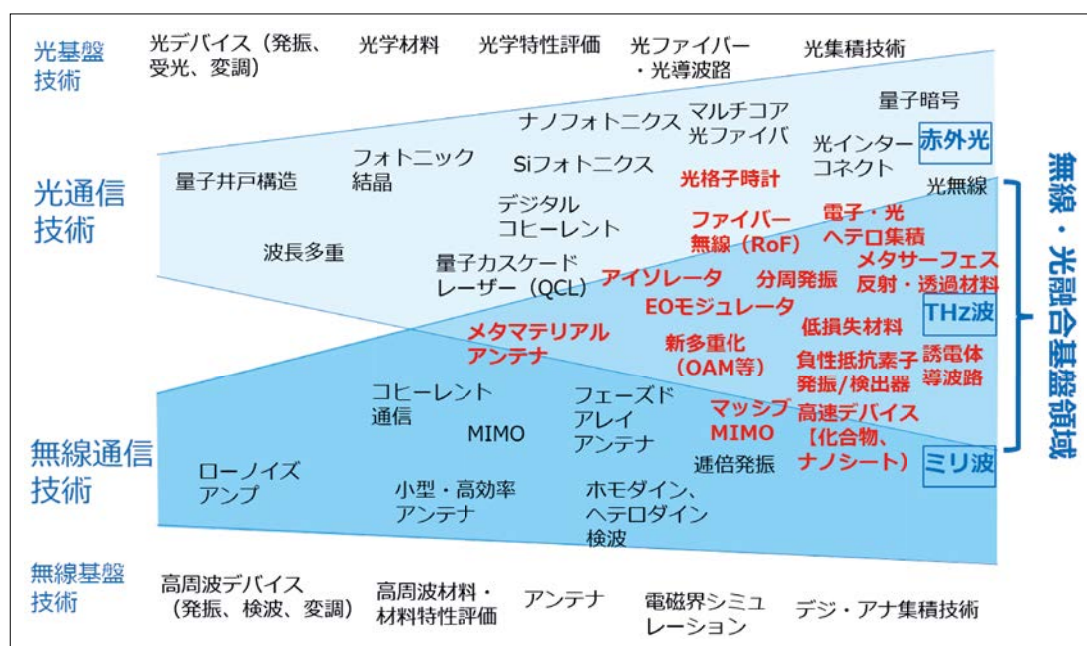


図3-2 強化すべき無線・光融合基盤技術

これらの研究開発課題を実施していくためには、材料、素子、回路など様々な技術レイヤーの研究者が連携して研究開発を進める必要があり、具体的な研究課題とともにある程度の時間軸に対する共通の認識を持つことが重要である。そのためには、関係者で研究開発のロードマップを作成することが望まれる。図3-3は部分的ではあるが、これまで述べてきた研究開発課題に向けた技術に関してCRDSが作成したロードマップ案である。7Gの実用化が予想される2040年頃までの時間軸に対して、無線通信技術と光通信技術の性能目標とともに、主なハードウェア技術（評価技術、材料技術、素子技術、回路・アーキテクチャ技術、集積・実装技術）において目指すべき技術項目を記載している。例えば、一番下の材料特性計測・評価については、現状では100GHz帯の材料特性の計測が行われており、2025年頃には300GHz、2030年～2035年には1THz、2040年頃には3THzの評価技術とデータ取得が必要なことを示している。また、下から3番目は素子技術のシリコンCMOSデバイスについて示しており、世界的な半導体・システムロードマップ活動であるIEEE IRDS™（International Roadmap for Devices and Systems、<https://irds.ieee.org/>）で作成されている先端シリコントランジスタのプロセス世代（ノード）とその構造を参考にしており、様々な技術レイヤー

のロードマップを記載しているが、テラヘルツ帯の利用に向けたボトルネックとなるのがやはり狭義の「テラヘルツギャップ」の克服である。その研究開発の中心になるテラヘルツ波を効率的に発振し増幅できる素子と高周波回路については、このロードマップに示している化合物半導体や二次元材料を用いたトランジスタやレーザーだけでなく、3-4で示したような新たな原理に基づく素子などの研究開発を積極的に進め、可能性が見えてきたときにはロードマップに加えていくことが重要である。現状のロードマップはかなり大まかな記載になっているが、4章で述べるように、このようなロードマップを関係者で議論して更新していくことで、無線・光融合基盤技術の共通の研究開発目標に向かって研究開発を進めていくことが期待される。

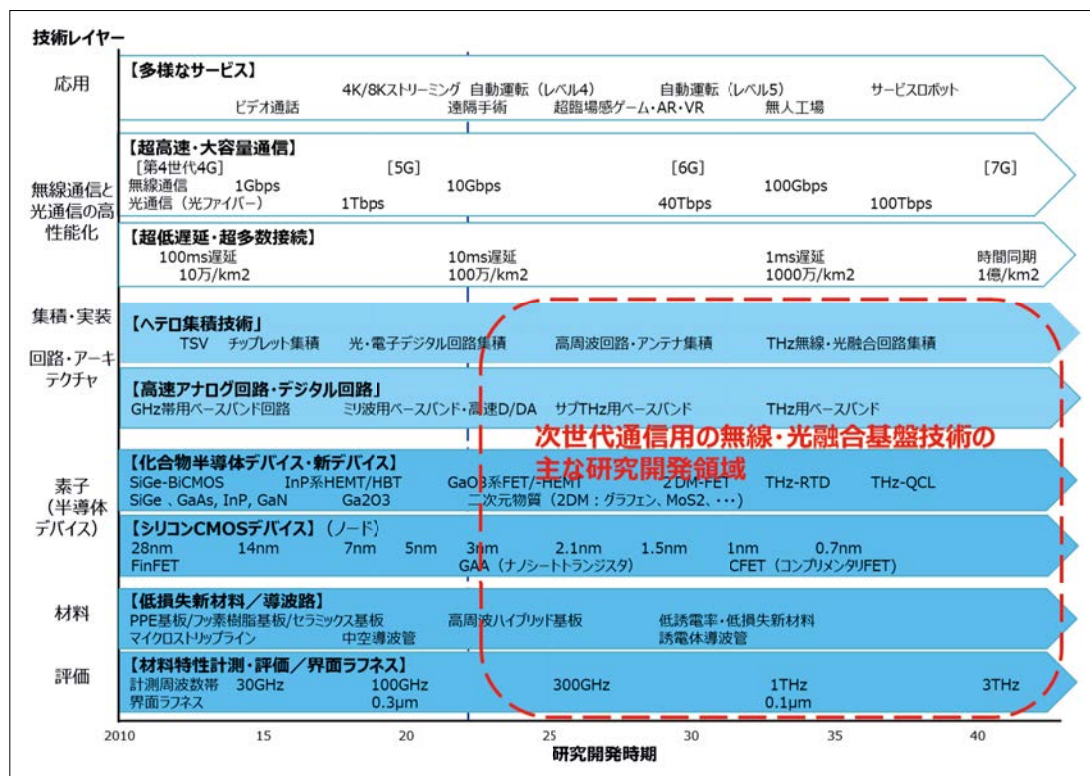


図3-3 無線・光融合基盤技術の研究開発ロードマップ案

コラム5

半導体ロードマップと通信用デバイス開発

国際的な半導体ロードマップはIEEE IRDS™（International Roadmap for Devices and Systems、<https://irds.ieee.org/>）で議論されており、日本では応用物理学会のシステムデバイス産学連携委員会が窓口となっている。シリコンロジック半導体デバイスや高周波デバイスなどの性能ロードマップ（対象範囲は10年後まで）が議論・記載されている。

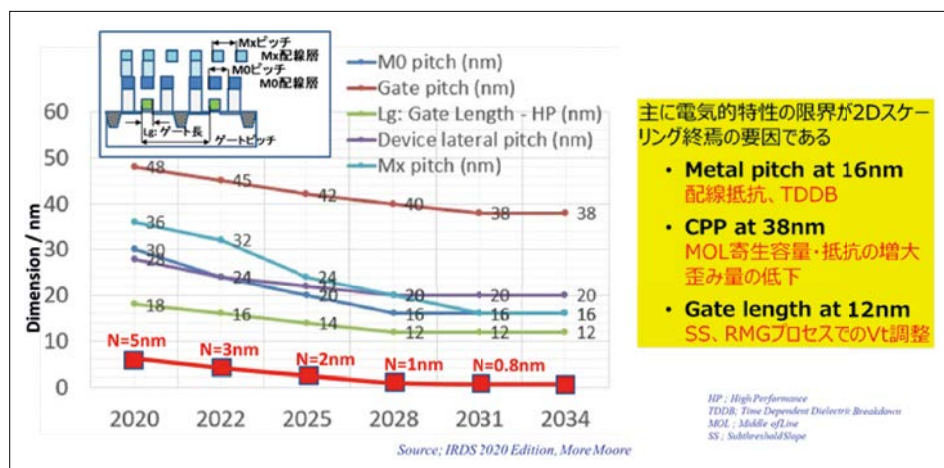
シリコンロジック半導体は、これまでMooreの法則に従い、主に微細化によりチップ上のトランジスタ集積度を2年～3年毎に2倍とし、2020年時点で、最先端

ロジックチップ上には、100億個超のトランジスタ集積が実現されている。しかしながら、微細化にともなうOn/Off特性の劣化や多層配線の寄生抵抗の上昇により、2次元平面内の寸法の縮小は2nm世代（N=2nm）以降で物理的限界に達すると予測されている（図C5-1）。

Mooreの法則（単位面積当たりのトランジスタ数）を維持するため、2025年以降では、ロジック半導体デバイスの3次元構造化が進展する。例えば、従来シリコン基板表面に形成されていた電界効果型トランジスタ（Field-effect-transistor：FET）は、厚さ10nm以下のシリコン単結晶薄膜からなる積層ナノシートに対して、原子層ゲート絶縁膜と仕事関数制御用の原子層金属膜からなるゲートオールラウンド（Gate-all-around：GAA）構造を有するGAAFETになる。これにより、単位面積あたりの駆動電流量が増大するのみならず、電流の増幅率を示す最大遮断周波数（ f_T ）や電力の増幅率を示す最大発振周波数（ f_{max} ）も400GHzを超えると予測されている。少なくとも、Beyond 5G/6G無線対応のデジタルベースバンドロジック（DBB）や、パワーアンプを除く高周波アナログフロントエンド（RF-AFE）はデジタルアシスト機能やAIアクセラレータ機能を盛り込みながら、シリコンCMOS集積回路をベースに開発が進んでゆくものと思われる。

高周波パワーアンプ用のトランジスタに関しては、シリコンよりも電子移動度が大きく高い周波数までの動作が可能な化合物半導体（GaN、GaAs、InPなど）が期待されている。しかし、いずれの半導体でも200GHzを超えると飽和出力電力が著しく低下しており、コラム2で述べた「テラヘルツギャップ」に直面している。このため、ロードマップ上も材料・デバイス構造・回路方式の破壊的イノベーションが必要とされている。

実装では、異種半導体チップやMIMOアレーアンテナを3次的に実装する“3D-chiplet”型高周波モジュール、およびシームレスな設計ツールの開発が期待されている。



図C5-1 ロジック半導体の2次元微細化トレンドと物理寸法微細化

4 | 研究開発の推進方法および時間軸

3章で述べた無線・光融合基盤技術の研究開発を効率的に進めていくために、図4-1に示すように、長期的な視野に立ち、高度な高周波特性評価が可能な共用施設、デバイス・モジュールなどの試作が可能な素子試作施設、機能検証可能な研究拠点などの整備、アカデミア・企業の有する多様なシーズ技術や革新技術の芽を育てて基盤技術としていく関連府省の連携による効果的なファンディング、国際標準化・知財戦略を見据えた産学官連携、国際連携、無線・光融合を主軸とする異分野が集まる新たな研究コミュニティの形成を促進していくことを提案する。以下、それぞれの推進方法の詳細について説明する。

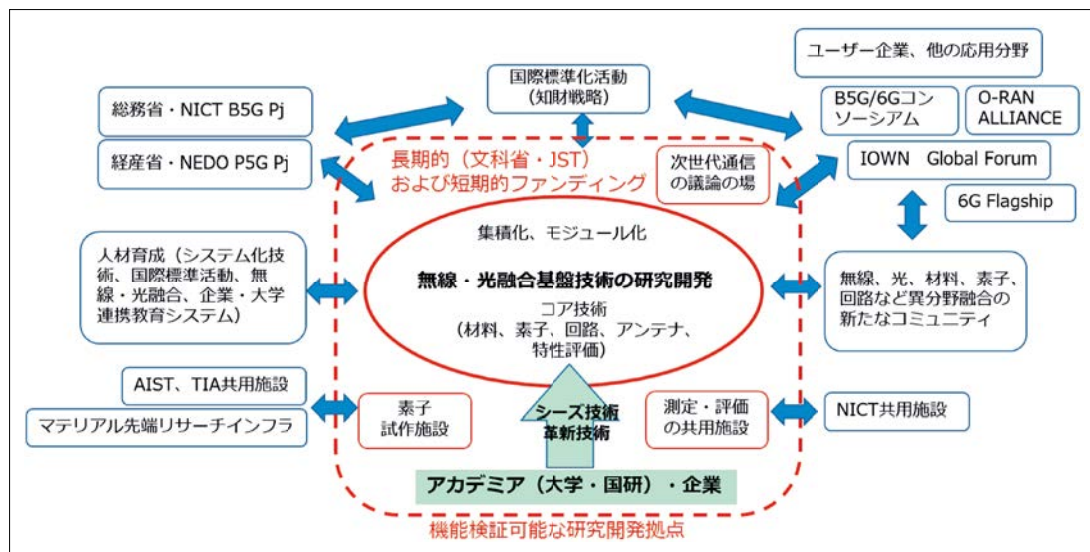


図4-1 無線・光融合基盤技術強化のための研究開発推進方法

4.1 テラヘルツ帯のデバイス試作、回路・アンテナ評価の共用施設の整備

未踏の周波数領域であるテラヘルツ帯に対応する材料や素子（半導体デバイス・ダイオード・トランジスタ、受動部品、アンテナなど）、回路の精密な高周波特性を測定するためには、これらの周波数に対応するスペクトルアナライザ、ネットワークアナライザなどの測定装置や、それに付随する低損失導波路、低損失コネクタなどの測定部品が不可欠である。しかし、例えばミリ波帯でも数千万円の装置や1個で10万円のコネクタなど、これらの測定装置や測定部品は非常に高価であり、単独の大学では測定システムとしての購入・保有が難しい。このため、これらの高価な高周波用の測定装置・部品を誰でもが利用できる測定・評価のための共用施設の整備が重要である。共用施設としては、すでに多くの測定・評価装置などを保有している大学やNICTのような国の研究機関の共用施設などをさらに充実させることが考えられる。さらに、大学や民間企業も使用できるように、文部科学省のナノテクノロジープラットフォーム（<https://www.nanonet.go.jp/>）のような仕組み作りが望まれる。

また、測定・評価した高周波特性のデータは、半導体デバイスやアンテナ、導波路などの素子設計や、高周波回路設計・シミュレーション、電磁界解析などにも不可欠であるため、これらに活用できるよう、データ

ベースとして整備しておくことも重要である。このような材料や素子、回路の高周波特性のデータベースを国の研究機関（例えば、NICT）で新たに整備していくことも考えられる。また、材料データベースとしては、マテリアルズインフォマティクスへの活用を目的としてNIMSに構築されているが、例えばこの材料データベースに高周波特性を付加するような形での整備も考えられる。

高周波や高速デジタル回路に用いる高性能な半導体デバイス・集積回路の試作についても、半導体プロセス設備が揃っていない研究機関や、海外ファウンドリーに高額な試作費用を捻出できない研究者にとっては、研究が困難になってきている。このため、半導体デバイス・集積回路の試作・評価ができる施設の整備が必要である。これには、AIST、NIMS、TIAが保有しているスーパークリーンルームなどの半導体プロセス共用施設や、2021年度から開始された文部科学省のマテリアル先端リサーチインフラなどの活用、さらには国内の集積回路の設計拠点との連携などが重要になってくる。また、試作した素子・チップのユーザー側・応用側での機能評価ができるように、試作チップのサンプル提供が可能な仕組みも構築しておくことが望まれる。これにより、無線・融合基盤技術の様々な応用展開が加速することが期待される。

さらに、高周波特性評価や半導体デバイス試作だけでなく、各種素子のヘテロ集積化、モジュール試作、無線通信性能評価、高周波シミュレーション、応用を想定した機能検証などが可能な研究開発拠点の形成も重要である。個別のハードウェアの作製と評価だけでは、実際の通信システムに利用できるかどうか明確ではなく、ある程度利用形態や応用を想定した機能検証ができる仕組みの構築も望まれる。これら全てを一箇所の集中的な拠点で行えるのが理想ではあるが、多くの時間・費用・人が必要になるため、通信分野で多くの装置・設備を保有しているNICT、AISTなどの国の研究機関や大学を連携させたバーチャルな拠点とすることが現実的だと考えられる。

4.2 新たな研究開発プロジェクトの推進

これまで、通信関係の研究開発は総務省主導で進められてきており、今後のBeyond 5G/6Gやそれ以降においても同様と考えられる。一方で、これからの通信技術においては高速化・大容量化、低遅延化、超多数同時接続、低消費電力化、未踏の周波数利用などの難しい課題が山積している。このため、将来の通信で必要となる要素技術・基盤技術については、短期的な実用化の視点だけでなく長期的視点での研究開発が重要であり、経済産業省および文部科学省関係の施策・プロジェクトと連携していくべきと考える。経済産業省・NEDOでは、ポスト5Gに向けて半導体技術などの研究開発を進めている状況であるが、文部科学省・JSTにおいてはさらに長期的視点での無線・光融合基盤技術のプロジェクトの推進が望まれる。具体的には、3章で述べた研究開発課題である未踏の周波数領域の利用、無線通信と光通信の高度利用に向けた基盤技術の研究開発、技術進化を支える基礎科学・材料研究に関して実施すべきである。

このようなプロジェクトは、個別の課題を独立に実施するのではなく、ビジョン・目的を明確にしたうえで、実現したい目標に向けた既存の研究組織を超えた連携をすべきである。また、得られた研究成果を論文にするだけでなく、将来の国際標準化活動や日本の産業競争力の強化の視点から、新たな研究成果や知見を特許化していくことも重要である。知財戦略はアカデミア単独では難しい面もあり、利用企業も含めた検討が望まれる。

さらに、このような研究開発に基づいて創出された新たな基盤技術を上位レイヤーなど他の領域の研究開発に繋げていく仕組みや、社会に実装する仕組みも望まれる。例えば、研究成果として得た先進的な素子や装置をコンペティションやイベントで他の研究・開発グループ等実際に使用してもらい、関係者を広げていくような仕組みも考えられる。研究成果の社会実装については、米国の事例を見ると、公共調達を活用したスタートアップ企業の技術の実用化が図られている（「最強のスタートアップ補助金」の実現に向けて－日・米・

欧におけるスタートアップ向けファンディング・プログラムの比較研究－三菱UFJリサーチ&コンサルティング 2019/5/21）。我が国においても、近年はベンチャー企業支援・育成事業が拡充されつつあるが、さらにその先の取組として、公的なファーストカスタマーを確保し、新興企業を育成するための仕組み作りに期待する。

4.3 新たなコミュニティの形成

2章で述べたように、我が国の通信分野のコミュニティは産学の連携不足、人材不足の問題を抱えている。そのため、今後の我が国における無線・光融合基盤技術の進展およびその産業競争力の確保に向けては、分野や産学官の垣根を超えた新たなコミュニティの形成が必要である。

具体的には、まず関係分野の研究者・技術者の交流・議論を活性化する場を構築すべきである。単に技術発表の機会を提供することにとどまらず、信頼、共感、理解が得られるように本気で話し合うことのできる場となることが重要である。また、将来を担う若手研究者を積極的に巻き込み、彼らが中心となり議論をリードするような雰囲気醸成が求められる。このような場で我が国が長期的に目指す次世代通信について議論することで、その方向性がより明確になることが期待される。産業界からは次世代通信システムの方向性とニーズ、アカデミアからは新たなシーズ技術が示され、行政も含めて方向性と戦略、課題について膝を突き合わせた議論をすべきである。学会などが中心となり、このような新たなコミュニティの形成を積極的に進めることが望まれる。一部の学会ではこのような動きがすでに進みつつあり、その加速が期待される。また、関係企業を中心にしたコンソーシアムを形成し、そこを核とした新コミュニティの形成も考えられる。これらの場では、直接的に関係する研究者・技術者だけではなく、将来の利用者となり得る者（例えばAI関係者など）も巻き込んで、バックキャストとフォアキャストの両面からの議論が望まれる。それにより、技術の受け皿となる裾野の拡大が期待される。

このような様々な分野の関係者が集うコミュニティにおいて、活発な議論の妨げとなるものの一つが技術用語の問題であり、複数の分野に詳しい研究者・技術者にその違いを説明して間を取り持ってもらうなど、相互理解を促進するための様々な方策も考えていくべきである。さらに、このようなコミュニティの形成とそこでの議論を牽引できるリーダの開拓・育成を行っていくことが望まれる。このようなリーダとしては、ハードウェアの要素技術・基盤技術についての知識を有するだけでなく、通信システムの中でのその技術の役割や重要性を理解し、将来の通信技術の進展の方向性やそれを用いた新たなサービスの可能性を認識し、国際標準化の活動にも積極的に参加できる人材が望まれる。しかし、そのような人はごく限られていると思われるので、若手の積極的登用など、前例や慣例にとらわれない大胆なアプローチをすべきである。

4.4 長期的視点での国際標準化に繋がる連携体制の構築

近年、日本は諸外国と比較して、システム産業が弱く、部品産業が強いという傾向がある。強い要素技術に基づき個々の製品を作れる企業は多数あるが、オープンイノベーションの仕組みを利用して世界のデファクトスタンダードとなるようなシステム機器を産み出す企業は存在しない。5G以降の通信インフラは、IoTを取り込み、Society 5.0の実現に大きく係わっていくため、通信産業単独の問題ではなく、部品産業からシステム産業、サービス産業へと階層的でグローバルな産業構造が進展する中で日本のポジションが失われるリスクもある。このため、クローズ戦略により自らの強みを強化しつつ、オープンに仲間作りを行い研究開発から

市場へのスピードを高めるといった、オープン・クローズ戦略は極めて重要になってきている。

携帯電話方式などで進められてきた標準化団体による国際標準化活動は、自方式を普及させる戦略として引き続き重要であり強化が不可欠である。しかし、サービス、システム、デバイスの階層構造を考えると、日本としては、自動車や工場自動化などの通信を利用したシステム・サービスにおいて、強い要素技術に裏打ちされたシステムとサービスを標準化に提案することも必要と考えられる。かつてはモバイル通信領域の3GPP一辺倒だった標準化も、今後は応用領域毎の業界バリエーションが産み出されていく可能性が指摘されている。この観点から、研究開発課題を具体化する段階や研究成果から実用化へ踏み出す段階においては、今後の社会の全体像を意識した国際標準化活動を推進するために、アカデミアと産業界の熱い議論、異分野の研究者・技術者間の熱い議論などを活発化するため場の設定が望まれる。また、基盤技術を産み出す段階から将来の標準化を意識して、諸外国の活動と連携して進めていくことも重要である。欧州の6G Flagshipにおけるホワイトペーパーの作成には、30か国270人が参加している。このような共通の将来ビジョンの構築は、もはや一か国で行う話ではなくなっており、多数の国・多数の人たちが関わっている。このような国際連携を進める上では、例えばすでに国内で組織化されているBeyond 5G推進コンソーシアムと欧州の6G Flagshipとの意見交換・連携活動を積極的に進めていくことや、国内の研究機関と海外の研究機関との間で、研究者の相互受け入れや兼務による共同研究などを幅広く進めていくことが重要と考えられる。

通信の整備は、かつては国家計画であったが、通信の自由化やインターネットの登場以降は、民主化／オープン化によって世界の投資を味方にして自由に発展してきたところがある。一方でテラヘルツ波に関係する要素技術・基盤技術は、米国では、DARPAから軍事技術、さらに一般マーケットという流れによって、技術開発と市場への展開のギャップが補われて発展すると考えられる。経済安全保障の考え方が日本でも叫ばれているが、重要技術領域では国が主導して育成するスタイルも必要である。通信技術の国際標準化においては、システム・サービスはオープンにし、デバイス・材料関係の技術はクローズドに強化する、といったオープン・クローズ戦略の使い分け、研究開発投資の集中と選択、オープンイノベーション領域の特定を具体化することが期待される。

4.5 人材育成

人材育成は、研究開発とともに、分野の発展、我が国のプレゼンス維持・向上を目指すための不可欠な取組である。無線・光融合基盤技術の研究においては、無線や光など複数の分野にまたがる知識が求められる。研究領域や技術分野の細分化が進む中、このような分野融合領域において活躍し得る研究者人材の育成は急務である。大学においては分野横断的な大学院教育コースなどの設置が望ましい。さらにニーズプル（ポテンシャルマーケットドリブン）型の研究開発ができる人材も求められる。即ち、価値あるサービス・ソリューションを実現するためには、要素技術、製造、マーケティング、ビジネスモデルなどをゲーム「テトリス」のピースのように考えて、これらを回転させて組み合わせるような人材の存在も重要である。日米の大学を比較すると、このような人材が日本では少ないことが指摘されている。NSF（National Science Foundation：アメリカ国立科学財団）におけるI-Corpsや、JSTにおける共創の場のようなエコシステムを構築するプロジェクト体制が今後重要である。

研究者やコーディネータのような専門家の育成に加えて、先にも述べた関連研究者、企業を引っ張り、我が国の無線・光融合基盤技術の研究開発を引っ張るリーダーの育成も不可欠である。すでに議論されてきたとおり、これまでそれぞれの分野の交流が進まず、蛸壺的に進化してきてしまったことが、当該分野におけるプレゼンスの低下をもたらした。現状を打破し、無線・光融合基盤技術分野において世界に先んじるためには、既存分野の権威をおそれず、その壁を壊してしまうような勢いと意欲をもった強力なリーダーの出現が待たれる。

ここでのリーダは必ずしも研究者・専門家である必要はなく、ニーズとシーズのマッチングを図り、戦略を示せる人物が望ましい。また、開発した技術を産業に昇華させるためには、国際標準を確保することが不可欠である。しかし、その活動をリードできる人材は我が国においては大きく欠如しているのが現状である。このような多様な人材の育成には、大学間、大学と産業界との間の垣根の除去、クロスアポイントメント制度などを活用した人材流動化、教育システムの構築などに加え、若い時から国際標準化の議論の場を経験させることなどが望まれる。

4.6 時間軸

次世代通信技術に関わる無線・光融合基盤技術の研究開発は、次の移動体無線技術である Beyond5G/6G に向けたものだけでなく、その先の 7G やそれ以降の世代や、基幹通信網の光通信技術のさらなる大容量化、コンピュータネットワークなど関連領域の進展を見据えて検討しておくことが不可欠である。特に、通信技術は国際標準化が重要であり、次の無線通信の世代に対する具体的な議論が始まる前から将来の通信技術の方向性を議論するフォーラムへ参加しておくことが必要である。将来の通信技術の方向性の議論が始まる前に、日本でどのような新しい技術の芽が育ちつつあるか、そのレベルはどの程度か、といったことに対して産学官での情報共有を図っておくことが必要である。例えば、6G の実用化は 2030 年頃と見込まれており、具体的な標準化の議論は 2025 年頃から開始されると考えられる。その数年前から始まるフォーラムへの参加にあたってはあまり時間的な余裕がないが、現在の日本の持つ優位な技術について把握し、それに基づく新たな方向性の提案が早急に望まれる。次の 7G については 2040 年頃の実用化で国際標準化の議論開始は 2035 年頃だと思われ、ここまでは時間的な余裕がある。そのため、国際標準化を見据えて新たな技術創出への挑戦を積極的に進め、国際標準化の議論の方向性と合致するものについては早期に情報発信していくことが望ましい。これには、これまでも進められてきている総務省・NICT や経済産業省・NEDO のプロジェクトだけでなく、長期的な視点での文部科学省・JST のファンディングによる目的基礎研究の実施が望まれる。

図 4-2 にはこのような次世代通信技術に貢献する無線・光融合基盤技術に関する国のプロジェクトの推進に関する一つの案を示している。これまでは、総務省や経済産業省が主導し、産業界を中心に大学や国の研究機関が参加する形で、実用化を目指したプロジェクトが行われてきた。しかし、未踏の周波数領域であるテラヘルツ波を使いこなせるようにするためには、技術的課題が多く、従来技術の改良ではない革新的な技術の創出も重要である。このためには、大学の持つシーズ技術のブラッシュアップや全く新しい技術への挑戦が不可欠であり、5 年～10 年にわたる長期的な視点で基盤技術・基礎科学の研究開発に対する文部科学省・JST からのファンディングが望まれる。このような基盤研究・基礎科学は、通信システムや上位の技術レイヤーからの要望や、現状の研究開発の方向性ともある程度の整合を取って進める必要があるので、総務省や経済産業省のプロジェクトとも連携する形で進めてもらいたい。文部科学省・JST のプロジェクトでの研究成果を総務省・NICT や経済産業省・NEDO のプロジェクトに活用していくことや、その逆に総務省・NICT、経済産業省・NEDO のプロジェクトで基礎研究や基盤技術の研究に立ち戻る問題などが出てきた場合には、文部科学省・JST の研究プロジェクトにフィードバックさせるような連携の形式を期待する。

基盤技術・基礎科学の研究開発は国内に閉じるのではなく、むしろ海外の研究機関との連携や、海外からの優秀な学生や研究者を受け入れて進めることが重要と考えられる。現状では日本国内に通信技術に関わる研究者は少なく、海外との連携や海外からの人材の受け入れによって効率的に研究開発を進めることが可能になる。このような活動は国際的な人脈形成や、標準化の活動、人材育成などにも良い影響を与えられ、プロジェクトの中で積極的に取り組むべきである。

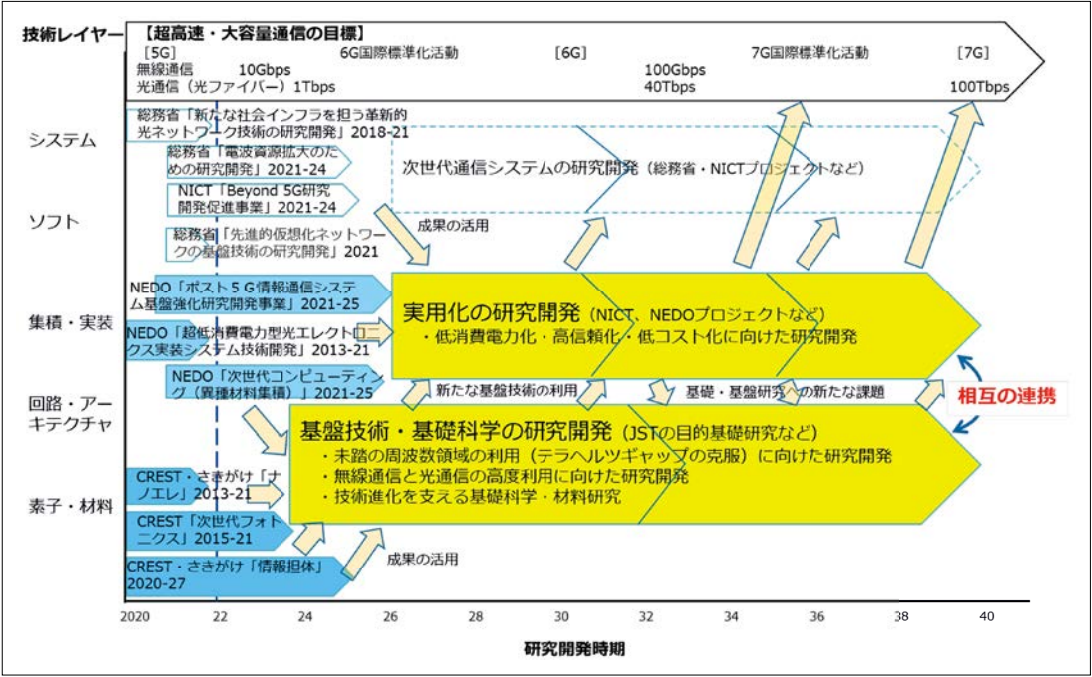


図 4-2 無線・光融合技術に関するプロジェクト推進案

付録1 検討経緯

- ・JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、令和3年度に戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補をCRDS戦略スコープ2021検討委員会を経て指定し、令和3年5月に検討チームを発足させた。その後、検討チームにおいて提言作成へ向けた調査・分析・検討を重ねた。
- ・チームの活動では、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程において提言の方向性を検討するため、以下の有識者へのインタビュー・意見交換、およびセミナー講演を実施した。
- ・その上で、無線・光融合基盤技術に関してCRDSが構築した仮説を検証する目的で、科学技術未来戦略ワークショップを開催した。ワークショップの結果は報告書として、令和4年2月にCRDSより発行している（CRDS-FY2021-WR-07）。
- ・CRDSでは以上の調査・分析の結果と、ワークショップにおける議論などを踏まえて、令和4年3月に本戦略プロポーザルを発行するに至った。

(1) インタビュー・意見交換を実施した識者（50音順、敬称略、所属・役職は実施時点）

No.	氏名（敬称略）	所属・タイトル
1	伊藤 智 村嶋 清孝	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 ユニット長 研究員（2021年3月まで）
2	岡田 健一	東京工業大学工学院 電気電子系 教授
3	川西 哲也	早稲田大学理工学術院 基幹理工学部 教授
4	菅野 貴皓	リバーフィールド CTO
5	昆 盛太郎 加藤 悠人	産業技術総合研究所 計量標準総合センター 研究グループ長 主任研究員
6	真田 篤志	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授
7	三瓶 政一	大阪大学大学院工学研究科 教授
8	篠原 真毅	京都大学 生存圏研究所 教授
9	清水 隆志	宇都宮大学大学院地域創成科学研究科 准教授
10	下西 英之	NEC システムプラットフォーム研究所 主幹研究員 / 大阪大学大学院 情報科学研究科 特任教授
11	鈴木 健仁	東京農工大学 工学研究院 准教授
12	須山 聡 奥村 幸彦	NTTドコモ 6G-IOWN推進部 担当課長 R&D戦略部 シニア・テクノロジー・アーキテクト
13	寒川 哲臣	NTT先端技術総合研究所 所長
14	田原 修一	光電子融合基盤技術研究所 専務理事
15	千葉 雅幸 大杉 伸也 岡本 昌之 高崎 高秀 田上 清人 小菅 理	新エネルギー・産業技術総合開発機構 IOT推進部 主幹 主任研究員 専門調査員 専門調査員 専門調査員 専門調査員

16	釣谷 剛宏 西村 公佐	KDDI 総合研究所 次世代インフラ1部門 執行役員 光アクセスネットワークグループ シニアエキスパート
17	中尾 彰宏	東京大学大学院 工学系研究科 教授
18	中島 邦彦	太陽誘電株式会社 営業本部 販売企画室
19	永妻 忠夫	大阪大学大学院基礎工学研究科 教授
20	中戸川 剛	NHK 放送技術研究所 伝送システム研究部 上級研究員
21	納富 雅也	東京工業大学理学院 物理学系 教授
22	西山 伸彦	東京工業大学工学院 電気電子系 教授
23	藤島 実	広島大学大学院 先進理工系科学研究科 教授
24	竇迫 巖	情報通信研究機構 Beyond5G 研究開発推進ユニット ユニット長
25	本城 和彦	電気通信大学先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター 客員教授
26	松浦 幹太	東京大学 生産技術研究所 情報・エレクトロニクス部門 教授
27	村田 博司	三重大学大学院 工学研究科 教授
28	森川 博之	東京大学大学院 工学系研究科 教授
29	若林 知敬 相葉 孝充	矢崎総業株式会社 技術研究所 部長 リーダー

(2) セミナー講演を依頼した識者（50音順、敬称略、所属・役職は実施時点）

- ・永妻 忠夫 大阪大学大学院基礎工学研究科 教授
- ・本城 和彦 電気通信大学先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター 教授

(3) 科学技術未来戦略ワークショップ（2021年11月）

「次世代通信技術の高度化に向けた無線・光融合基盤技術」

【日時】2021年11月13日（土）9：30～17：00

【会場】TKP市ヶ谷カンファレンスセンターバンケットホール8Bおよびオンライン（Zoom）

【プログラム】

（敬称略）

開会挨拶

曾根 純一（JST-CRDS）

ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

馬場 寿夫（JST-CRDS）

（話題提供1）無線・光融合が拓く次世代通信技術に対する要求と期待

無線・光融合が拓く次世代通信技術への要求

竇迫 巖（NICT）

バーティカルサービス×次世代通信×日本

森川 博之（東京大学）

遠隔医療・手術ロボットからの次世代通信技術に対する期待

菅野 貴皓（リバーフィールド）

（話題提供2）次世代通信の技術展望とコンソーシアムの取組

6Gの進化の方向性

須山 聡（NTTドコモ）

Beyond5Gに向けた研究開発

中尾 彰宏（東京大学）

（話題提供3）次世代通信技術に向けた挑戦的な無線・光融合基盤技術の研究開発

THzシステムに向けたデバイス・回路技術

永妻 忠夫（大阪大学）

Massive MIMOの限界とブレイクスルー技術

本城 和彦（電気通信大学）

THzメタサーフェス技術

真田 篤志（大阪大学）

無線・光融合に向けた異種材料集積光回路技術

西山 伸彦（東京工業大学）

高周波材料特性評価技術

加藤 悠人（産業技術総合研究所）

総合討論

ファシリテーター：岩本 敏（JST-CRDS）

1. 我が国が長期的に注力すべき次世代通信基盤技術の研究領域
2. 次世代通信基盤技術の活用が期待できる他の技術領域や魅力的な応用
3. 次世代通信システムの視点も含め基盤技術を強化する研究開発体制
4. 技術や知見の融合による新たな学術領域の形成などを目的に、無線技術、光技術など
異分野横断のコミュニティ形成方法
5. その他（ニーズとシーズの融合や国際標準化活動に向けた産学官連携、海外連携、人材育成など）

閉会挨拶

曾根 純一（JST-CRDS）

【話題提供者】

- ・ 竇迫 巖 情報通信研究機構 Beyond5G研究開発推進ユニット ユニット長
- ・ 森川 博之 東京大学大学院 工学系研究科 教授
- ・ 菅野 貴皓 リバーフィールド CTO
- ・ 須山 聡 NTTドコモ 6G-IOWN推進部 担当課長
- ・ 中尾 彰宏 東京大学大学院 工学系研究科 教授
- ・ 永妻 忠夫 大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授
- ・ 本城 和彦 電気通信大学 先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター 教授
- ・ 真田 篤志 大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授
- ・ 西山 伸彦 東京工業大学工学院 電気電子系 教授
- ・ 加藤 悠人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 主任研究員

【コメンテーター】

- ・ 下西 英之 日本電気システムプラットフォーム研究所 主幹研究員、大阪大学大学院
情報科学研究科 特任教授
- ・ 藤島 実 広島大学大学院 先進理工系科学研究科 教授
- ・ 田原 修一 光電子融合基盤技術研究所 専務理事

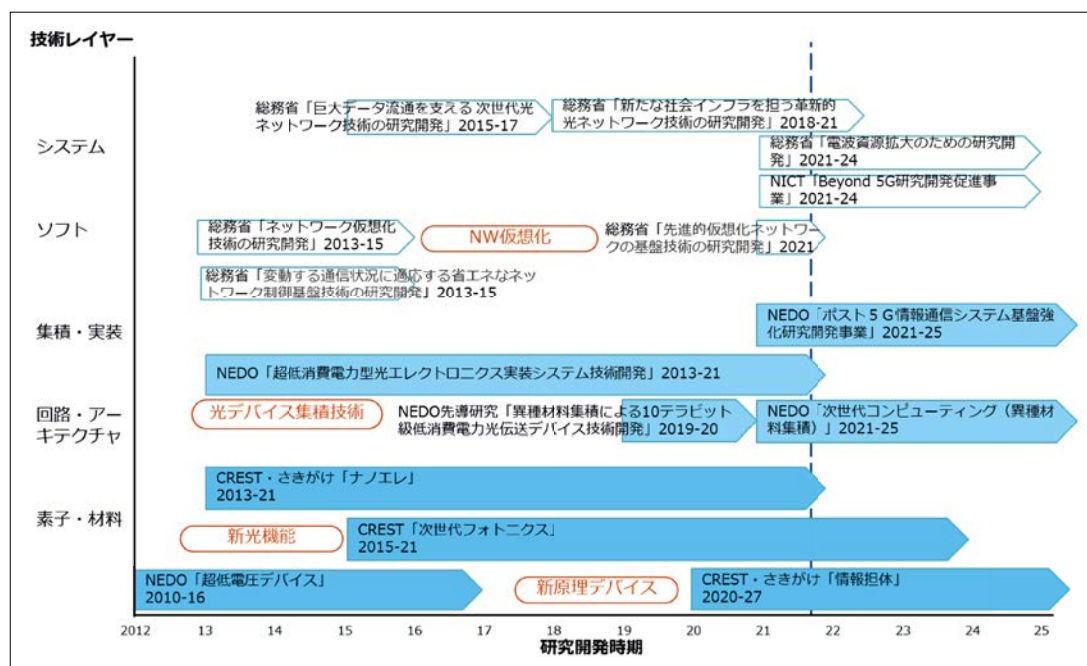
付録2 国内外の状況

(1) 日本の状況

Beyond 5G/6Gの次世代通信技術についての活動は2020年頃から活発になっている。Beyond5G/6Gの技術進化の方向性や社会実装のイメージに関するホワイトペーパーが、総務省、NICT、NTTドコモ、KDDI、NECなどから出されており、次世代通信技術開発の必要性や利便性の向上を社会に伝えていく動きが盛んになっている。

総務省において2020年1月から「Beyond 5G推進戦略懇談会」が開催され、そこでの提言を受けて6月に総務省から「Beyond 5G推進戦略－6Gへのロードマップ」が公表された。これを受けて産学官が連携してBeyond 5G推進コンソーシアムが設立されている。このコンソーシアムは、2021年にオウル大学を中心とした欧州の産学組織6G Flagshipとの連携協定を締結しており、今後の研究開発や標準化における協力関係が期待される。

民間では、2019年にNTTが中心となり、業界団体IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）Global Forumが設立されている。ここでは、エレクトロニクスとフォトリソの融合により、電力効率の向上と高速・大容量通信を実現するネットワーク・情報処理基盤開発を進め、2030年の実現を目指している。また、次世代通信の研究開発検証施設として各国のプレイヤーにより設立されたオープンコミュニティTelecom Infra Project（TIP）において、2020年にKDDIは国内の施設となるTIP Community Labを設立するなど、国内通信事業者の研究開発の枠組みの整備が進行している。



図S2-1 通信関連の日本の主なプロジェクト

通信に関連する主なプロジェクトを図S2-1に示す。また、それぞれのプロジェクトの名称と実施期間を以下に示す。2010年代から総務省、経済産業省、文部科学省において、システム、ソフトウェア、集積・実装、回路・アーキテクチャ、デバイス・材料の技術レイヤーに亘って実施されてきた。現在ではBeyond 5G/6G

の実用化を目指したプロジェクトとして、総務省「電波資源拡大のための研究開発」、NICT「Beyond 5G 研究開発促進事業」、NEDO「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」などが推進されている。

総務省・NICT：

- 「ネットワーク仮想化技術の研究開発」2013–2015
- 「変動する通信状況に適応する省エネなネットワーク制御基盤技術の研究開発」2013–2015
- 「巨大データ流通を支える次世代光ネットワーク技術の研究開発」2015–2017
- 「新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発」2018–2021
- 「先進的仮想化ネットワークの基盤技術の研究開発」2021–
- 「電波資源拡大のための研究開発」2021–2024
- 「Beyond 5G 研究開発促進事業」(NICT) 2021–2024

経済産業省・NEDO：

- 「低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクト」(NEDO) 2010–2015
- 「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」(NEDO) 2013–2021
- 「異種材料集積による 10 テラビット級低消費電力光伝送デバイス技術」(NEDO 先導研究) 2019–2020
- 「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」(NEDO) 2020–2025
- 「異種材料集積光エレクトロニクスを用いた高効率・高速処理分散コンピューティングシステム技術開発」(NEDO) 2021–2025

文部科学省・JST：

- CREST・さががけ「ナノエレクトロニクス」2013–2021
- CREST「次世代フォトンクス」(JST) 2015–2021
- CREST・さががけ「情報担体」(JST) 2020–2027

(2) 欧州の状況

欧州は、6G、テラヘルツ研究が世界的にも早期から着手してきている。ドイツのフラウンホーファー研究機構では 2015 年～2019 年に、無線・光ハイブリッド集積技術として 5G 向け 28GHz バンドのリモートアンテナ用の無線・光ハイブリッド集積トランシーバー HAMLET (Heterogeneous Advancement and hybrid integration of polyMer and triPLEx platform for integrated microwave phoTonics) を開発している。

6G では、2018 年にフィンランドのオウル大学が産学組織 6G Flagship を立ち上げている。これは、フィンランド・アカデミーの資金提供による Finnish Flagship Programme の一つであり、無線通信技術、デバイス・回路技術、分散コンピューティング、サービスおよびアプリケーションの研究を目的としている。オウル大学は世界に先駆けて 6G の検討プロジェクト (6Genesis; 2018 年～2026 年) を開始しており、xR (x-Reality)、ホログラム、自動運転などを主なユースケースとして、ワイヤレス接続、分散コンピューティング、デバイス・回路技術、サービス・アプリケーションなどを重点研究分野と位置付けている。2019 年には各国の研究者が参画した 6G Summit を主催し、ホワイトペーパーを公表している。

また、Horizon2020 の資金提供によって、5G 超での高度なワイヤレスプラットフォームに関する欧州・米国の共同開発プロジェクト EMPOWER (<https://www.advancedwireless.eu/>)、ノキアとエリクソンが主導する 6G 関連の産学コンソーシアム Hexa-X などが次々と発足している。Horizon Europe においては、6G 関連の集積フォトニクスなどを含めた複数の研究プロジェクトが進行している。

半導体では、ベルギーの IMEC (Interuniversity Microelectronics Centre) で次世代のデバイス間通信、高品質 AR/VR、100GHz 超のバックホールなどの用途として、高帯域幅でのハイブリッド III-V/CMOS 半導体や低パワー A/D 変換回路などの研究開発を進めている。

(3) 米国の状況

米国では、2015年から国防総省（DoD）で光集積回路の研究開発を行う先進製造拠点としてAIM Photonicsが設立され、2019年からはDARPAによるデジタル・マイクロエレクトロニクス向けの広帯域光信号技術の研究開発プロジェクトPIPES（Photonics in the Package for Extreme Scalability）、テラヘルツ帯までの高周波応用を目指すCMOSプラットフォーム上の化合物半導体の高周波デバイス・回路、光デバイスなどの集積プロジェクトDAHI（Diverse Accessible Heterogeneous Integration）などの研究開発が進んでいる。

2019年に当時のトランプ大統領が自身のツイッターで6Gの取り組みの強化を表明し、同年FCC（Federal Communications Commission）がテラヘルツ帯（95GHz～3THz）を実験用ライセンスとして利用を許可したことを受けて、6G関連の研究開発の取り組みが加速している。NSFの資金で5G研究開発実証のオープンテストベッドを提供する高度無線研究プラットフォーム（Platforms for Advanced Wireless Research, <https://advancedwireless.org/>）が設立され、新しいワイヤレスデバイス、通信技術、ネットワーク、システム、およびサービスの研究開発の環境整備も行なわれている。

また、2019年には上述のオウル大学の6G Flagship主催で開催された6G Summitに、2020年からはIEEEが技術協賛として参画し、6G Wireless Summitとして開催され、米国関係機関を始め各国からの参加が進んでいる。

(4) 中国、韓国、その他の状況

中国では、2019年に科学技術部（MOST）が6Gの研究開発開始を発表し、さらに清華大学が6G Summitにおいて、AIがあらゆるネットワークに関与する「Connected Intelligence Via AI」のコンセプトを発表している。また、中興通訊（ZTE）は、6Gの中核となる3つの技術としてAI（Intelligent and Cognitive System）、フォトリソグラフィ（Photonics and Photonic Integration Technologies）、ホログラフィー（RF Holography and Computational Holography）を挙げている（出典：B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang, and J. Wang, “6G technologies: Key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies,” IEEE Vehicular Technology Magazine, vol.14, issue3, pp.18–27, Sept. 2019.）。さらに、電子科技大学は、2020年に世界初の第6世代移動通信技術（6G）試験衛星の打ち上げを行っており、テラヘルツ波通信設備による宇宙空間での技術検証を進めている。（出典：AFPBB News, <https://www.afpbb.com/-/articles>）

韓国では、科学技術情報通信部（MIST）と韓国電子通信研究院（ETRI）が主導して、「AIを活用したネットワーク・リソース管理」、「分散型信頼確保（ブロックチェーンなど）」、「高セキュリティ通信」、「海上・水中通信」などの実現を目指し、産学官一体で6Gのための中長期研究開発事業（2020年～）に取り組んでいる。また、2019年に韓国科学技術院（KAIST）とLG電子が連携して6G技術の主導権確保や技術を活用した新ビジネス創出を目的としたKAIST 6G研究センターを設立、Samsungも2019年にAI技術やコアネットワーク技術の研究開発の推進を目的とする研究所（Advanced Communication Research Center）を設立するなど、6G分野での国際的な主導権確保に向けた動きが加速している。

国際機関では、国際電気通信連合の電気通信標準化部門（ITU-T）において2018年の第13研究委員会（SG13）で、「2030年代に向けたネットワークの在り方に関する検討」（FG NET-2030）というFocus Groupを立ち上げている。2019年には実現が期待されるユースケース（ホログラム通信や感覚通信など）やその実現に向けた課題、要求条件などに関してホワイトペーパーをまとめており、6Gに向けた検討が進行している。

IEEEでは、無線アクセス系を中心とした6Gの実現技術と関連するユースケースを整理し、具体的なKPIを定義して2022年以降の実証に向けた具体的な検討を開始している。さらに、3GPPにおいても2023年頃から6G標準化の検討を開始する見込みであり、2027年頃の標準策定を予定している。

(5) 論文の推移

図S2-2と図S2-3に、以下の検索式で検索した次世代通信技術に関する論文の年度別の総論文数と国別論文数を示す。論文数の推移を見ると、移动通信システムの世代交代の直前に論文が増加し、その後しばらく落ち着いているが、次の世代に近づくにつれて論文数が増加する、ということを繰り返しながら、順調に件数が増えてきている。国別では、他の分野と同様にトップの米国を中国が追い抜くという現象が起きている。その中であって、我が国は継続的に総論文数で第3位の位置を保っている。論文件数の個人別カウントでも、我が国から5名がトップ10入りを果たし、発表機関別でもトップ10のうちの4組織を占めており、技術的には高い位置にあると言える。しかし、個人別、組織別で高い位置にありながら、総論文数で3位にいるということは、裾野の広がりには欠けるということではないだろうか。研究をリードする立場の研究者や研究組織が多くあるということは大変結構なことであるが、これらが力を持っている間に次代の研究者や研究組織を育成していかなければならないと考えられる

【検索式】

```
title_abs_key : ( ("wireless network*" OR "radio network*" OR "wireless communication" OR "radio communication" OR "optical network*" OR "optical communication") AND ("beyond 5G" OR "post 5G" OR 6G OR 7G OR "millimeter wave" OR terahertz OR THz) AND (device* OR antenna* OR MIMO OR circuit* OR material* OR metamaterial* OR metasurface* OR transmitter* OR receiver* OR simulation* OR characteri* OR measure* OR generator* OR detector* OR converter*) ) AND doctype : ("ar" OR "cp" OR "le" OR "no" OR "re") AND pubyear : [1981 TO 2020]
```

【サマリ】

文献数：7,328 被引用数：113,871 著者数：16,656

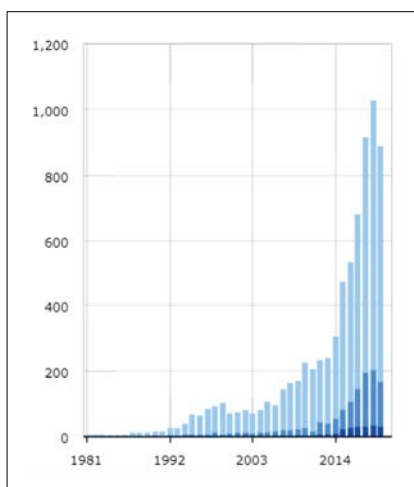
【データソース】

Scopus：2020年12月末データ（2020/12/31）

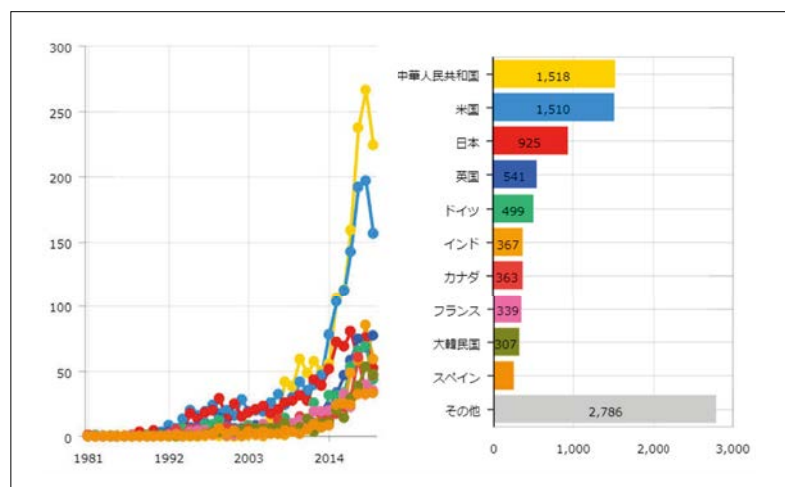
FMDB：2021年6月データ（2019年度報告書含む、科研費2020年11月末まで（奨励研究、特別研究費奨励費除く））

Hot Paper：Hotpaper 2012年v1-2021年v1

PATSTAT：2016年春バージョン



図S2-2 次世代通信関連の総論文数



図S2-3 次世代通信関連の国別論文数

付録3 専門用語解説

■ 3GPP (3rd Generation Partnership Project)

5GやBeyond 5Gなどの移動通信の規格を策定する団体。3GPPで策定された規格を元に各国の標準化機関が地域標準を制定し、各国の地域標準を元にITUが国際規格を制定している。

■ CDMA (符号分割多元接続：Code Division Multiple Access)。

複数の通信が同一の通信路を共用しつつ混信なく通信するための通信制御方式であって、CDMAは複数の通信に異なるスペクトル拡散符号を割当てて、同一周波数、同一時間の通信であっても、符号の直交性によって混信を排除する方式。主に第三世代携帯電話方式において音声通信で利用された。

■ DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)

米国の国家安全保障に必要な極めて重要な技術の研究を推進することをミッションとする機関。軍事技術にフォーカスして、新しい戦略や技術を開発するために、大学、企業、政府を含むイノベーションエコシステムを形成している。

■ FDMA (周波数分割多元接続：Frequency Division Multiple Access)

複数の通信が同一の通信路を共用しつつ混信なく通信するための通信制御方式であって、FDMAは周波数帯を分割して複数の通信に割当制御する方式。第一世代携帯電話方式などで利用された。

■ LiDAR (Light Detection And Ranging)

レーダー光を用いて、物体までの距離や方向を計測するためのセンサ技術。物体の位置や形状を検知でき、自動運転などで利用されている。

■ Local 5G

従来の通信事業者の周波数・システムにより提供される5Gサービスとは別に、企業や自治体が、独自に構築したシステムを利用して、ローカル5G専用の周波数を用いて提供する通信エリア限定の5Gサービス。

■ MIMO (multiple-input and multiple-output)

無線通信において、送信側、受信側ともに複数のアンテナを用いた複数の空間伝送路を構成することにより通信速度や通信品質を向上させる技術。空間伝送路から見たINPUT側が送信アンテナ側である。電波であるためアンテナ間で混信する状況が発生するが、複数の空間伝送路は送受信アンテナ間の伝搬行列として表現される。

■ OFDMA (直交周波数分割多元接続：Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

複数の通信が同一の通信路を共用しつつ混信なく通信するための通信制御方式であって、OFDMAは複数のサブキャリアを束ねて利用するOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 通信におけるサブキャリアとTDMAのタイムスロットの組み合わせを複数の通信に割当制御する方式。音声を含めた多様な速度の通信に柔軟に対応できるため、最新の通信方式として良く利用される。

■ Society 5.0

サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会。（内閣府 Society 5.0：https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/）

■ TDMA（時分割多元接続：Time Division Multiple Access）

複数の通信が同一の通信路を共用しつつ混信なく通信するための通信制御方式であって、TDMAは時間軸上を複数の短いタイムスロットに区切って割当制御する方式。第二世代携帯電話などで利用された。

■ アウトフェーディング増幅器

電力効率を高めるために、送信信号を振幅が一定で位相が異なる2つの信号に分離し、それぞれをトランジスタの電力効率の高い動作範囲で増幅した後に、再度ベクトル的に合成する増幅器。

■ 基地局のオープン化、Open RAN

基地局の無線機能（RU: Radio Unit）や無線制御装置（DU: Distributed Unit、CU: Central Unit）、管理機能などを、オープンインターフェース仕様に基づいて分離して、それぞれの機能ごとに構築できるようにすること。この基地局のオープン化により構築した基地局を一般に「Open RAN」と呼ぶ。

■ 進行波管（TWT：Traveling Wave Tube）

大電力の高周波増幅用として使用される電子管。電子ビームと、それを囲んで配置されたらせん状の導線に入力された信号との相互作用を利用している。放送分野やレーダーなどでは固体電子素子の性能を凌駕しているため広く利用されている。

■ チャネル状態情報（CSI：Channel State Information）

送信側から受信側への伝送チャネルの特性。このチャネル状態情報を送信側へフィードバックして送信側がビームフォーミングを行うことによりフェーズドアレイアンテナが実現される。

■ デジタルツイン

フィジカル空間（現実空間）の情報をIoTなどで収集して、サイバー空間（仮想空間）に現実空間を再現する技術。

■ ネットワークスライシング

サービスやユーザーに応じて、必要な通信リソースの割り当てや通信経路の構築を行うことにより、論理的にスライスされたネットワークを実現する機能。

■ フェーズドアレイアンテナ

無指向性の電波を送出するアンテナをアレイ状に複数並べて配置し、複数の通信相手毎に複数アンテナへの給電位相を制御し、通信相手毎の信号をそれぞれの通信相手毎の方向に強めて送信することを可能とする技術。その方向を適応的に制御する技術がアダプティブアレイアンテナ。この指向性制御技術は、電波の干渉を回避しつつ電波を遠距離まで到達させることを可能とし、Massive MIMOと呼ばれる無線基地局の多数接続技術実現のベースとなっている。

■ マルチアクセスエッジコンピューティング（MEC：Multi-access Edge Computing）

従来クラウドに設置されるアプリケーションサーバをモバイルネットワークの中に設置することにより、低遅延通信を実現する方法。例えば、ゲームのレスポンスの向上やAIによる画像識別の遅延低減などが可能となる。

作成メンバー

総括責任者	曾根 純一	上席フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
リーダー	馬場 寿夫	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
メンバー	岩本 敏	特任フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
	佐藤 勝昭	特任フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
	林 喜宏	特任フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
	赤木 浩	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
	高島 洋典	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
	的場 正憲	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
	福井 章人	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)
	井上 眞梨	フェロー	(システム・情報科学技術ユニット)[2021年9月まで]
	竹内 良昭	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
	池田 健	主任調査員	(戦略研究推進部)
	勝又 康弘	主任調査員	(戦略研究推進部)
	新井 正伸	主任調査員	(研究プロジェクト推進部)
	大窪 宏明	主任調査員	(研究プロジェクト推進部)

戦略プロポーザル

CRDS-FY2021-SP-07

無線・光融合基盤技術の研究開発

～次世代通信技術の高度化に向けて～

STRATEGIC PROPOSAL

Basic technologies for wireless and optical convergence toward advancing next-generation communication

令和 4 年 3 月 March 2022

ISBN 978-4-88890-782-8

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



<https://www.jst.go.jp/crds/>