

ワイヤレス分野の 技術ロードマップ

令和2年1月

1. 目的

通信機器の増加及び通信技術の進歩により、今後もワイヤレス技術の利活用が継続的に拡大している。このようなワイヤレス技術の利活用が急速な広がりや進歩を遂げる中、それを足下から支える技術の研究開発の重要性は高まっている。

また、国が実施する研究開発では真に必要でかつ優れた研究開発が効率的・効果的に行われるようにするとともに、その成果の国民・社会への還元を最大化することが求められるため、我が国が重点的に投資すべき分野・技術課題を的確に把握することが重要である。そのため、総務省では、2030年代を視野にワイヤレス分野についての国内外の技術動向調査と有識者へのヒアリングを行い、技術ロードマップをとりまとめた。

2 調査・分析・評価の全体フロー

技術ロードマップの作成にあたっては、図 2.1 に示す実施フローにて調査・分析・評価を実施した。

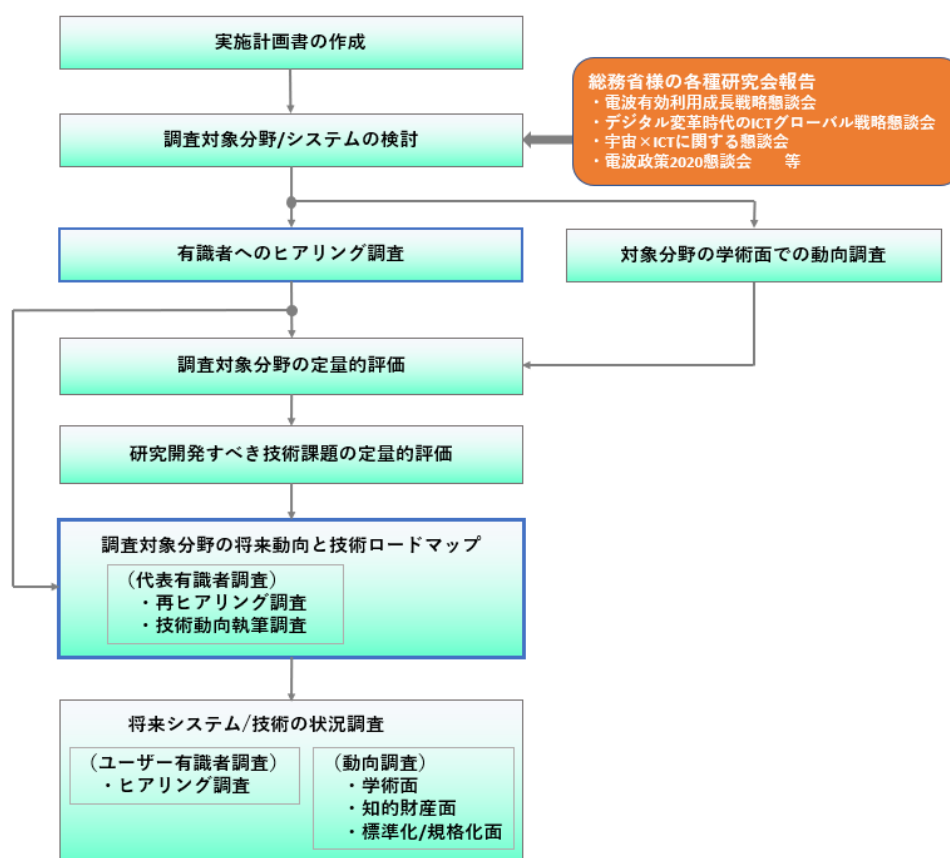


図 2.1 調査・分析・評価の実施フロー

3. 有識者ヒアリング

ヒアリングを実施した有識者（下線：代表有識者）の一覧表を、以下に示す。なお、代表有識者は下線で示している。

有識者一覧

分野	氏名	所属・役職	学会委員等
①移動通信	大槻 知明	慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 教授	信学会 無線通信システム研究専門委員会 委員長
	佐和橋 衛	東京都市大学 知識工学部 情報通信工学科 教授	信学会 無線通信システム研究専門委員会 顧問
	小川 将克	上智大学 理工学部 情報理工学科 教授	信学会 無線通信システム研究専門委員会 専門委員
②宇宙・衛星通信	梅比良 正弘	茨城大学 大学院 理工学研究科 工学野 電気電子システム工学領域 教授	信学会 衛星通信システム研究専門委員会 元委員長
	豊嶋 守生	情報通信研究機構 ワイヤレスネットワーク総合研究センター 宇宙通信研究室 室長	信学会 衛星通信システム研究専門委員会 顧問
	山下 史洋	NTTアクセスサービスシステム研究所衛星通信研究グループ グループリーダー	信学会 衛星通信システム研究専門委員会 委員長
③センシング/IoT	原 晋介	大阪市立大学 大学院 工学研究科 電気情報系専攻 教授	信学会 ヘルスケア・医療情報通信技術研究専門委員会 委員長
	嶋本 薫	早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 情報通信学科 教授	日本シミュレーション学会理事
	三次 仁	慶應義塾大学 環境情報学部 政策・メディア研究科 教授	
④電力伝送	篠原 真毅	京都大学 生存圏研究所 教授	ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム代表、WPT 専門委員
	庄木 裕樹	東芝研究開発本部 研究開発センター ワイヤレスシステムラボ ラトリ 上席エキスパート	BWF ワイヤレス電力伝送ワーキンググループ リーダー
	高橋 応明	千葉大学 フロンティア医工学センター 准教授	信学会 無線電力伝送研究専門委員会 委員長
⑤映像伝送	土田 健一	NHK 放送技術研究所 伝送システム研究部 研究主幹	
	中川 仁	(株)放送衛星システム (B-SAT) 総合企画室 専任部長	信学会 衛星通信システム研究専門委員会 専門委員
	工藤 栄亮	東北工業大学 工学部 情報通信工学科 教授	映像情報メディア学会 代議員
⑥モバイルティ	重野 寛	慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 教授	
	須田 義大	東京大学 生産技術研究所 次世代モバイルティ研究センター 教授	ITS Japan 理事、国交省 モビリティサービス談会
	小花 貞夫	電気通信大学 産学官連携センター長 特任教授	
⑦セキュリティ	園田 道夫	情報通信研究機構 ナショナルサイバートレーニングセンター センター長	総務省 サイバーセキュリティタスクフォース構成員
	高倉 弘喜	国立情報学研究所 サイバーセキュリティ研究センター センター長 教授	信学会 情報通信システムセキュリティ研究専門委員会 委員長
	横山 浩之	国際電気通信基礎技術研究所 適応コミュニケーション研究所 所長	
⑧デバイス	古神 義則	宇都宮大学 工学部 基盤工学科 情報電子オブティクスコース 教授	信学会 マイクロ波研究専門委員会 委員長
	久保田 周治	芝浦工業大学工学部情報通信工学科 教授	信学会 スマート無線研究専門委員会 顧問
	寶迫 巖	情報通信研究機構未来 ICT 研究所 所長	ARIB テラヘルツ調査研究会委員長
⑨アンテナ・伝搬	菊間 信良	名古屋工業大学 大学院 つくり領域 電気・機械工学専攻 教授	信学会 アンテナ・伝搬研究専門委員会 顧問
	今井 哲朗	東京電機大 工学部 情報通信工学科 教授	信学会 アンテナ・伝搬研究専門委員会 専門委員
	宮下 裕章	三菱電機 情報技術総合研究所 光電波・通信部門 統轄	

4. 技術の順位付け

ヒアリングの結果に基づき、国として投資すべき大項目技術の順位付けを行った。

順位	大項目技術	分野
1	③-2.エネルギー供給技術	③センシング/IoT
2	①-4.高周波通信技術	①移動通信
3	①-3.超低遅延技術	①移動通信
4	③-1.超大量接続技術	③センシング/IoT
5	①-2.超大量接続技術	①移動通信
6	⑦-1.ワイヤレスセキュリティ技術	⑦セキュリティ
7	②-2.高周波帯通信技術	②宇宙・衛星通信
8	①-1.超大容量化技術	①移動通信
9	⑥-2.コネクテッド・モビリティ技術	⑥モビリティ
10	⑦-7.次世代モビリティシステムに必要なセキュリティ技術	⑦セキュリティ
11	②-1.通信容量増大化技術	②宇宙・衛星通信
12	④-1.高効率大電力伝送化技術	④電力伝送
13	④-4.バッテリーレス化技術	④電力伝送
14	⑥-1.コネクテッド・カー技術	⑥モビリティ
15	⑨-3.伝搬シミュレーション技術	⑨アンテナ・伝搬
16	②-4.衛星間連携技術	②宇宙・衛星通信
17	⑧-1.集積回路技術	⑧デバイス
18	⑥-3.高度化 ITS 技術	⑥モビリティ
19	④-3.フルワイヤレス化技術	④電力伝送
20	⑦-4.ワイヤレス IoT システムに必要なセキュリティ技術	⑦セキュリティ
21	③-3.センサー連動技術	③センシング/IoT
22	⑨-4.ミリ波以上の高周波化技術	⑨アンテナ・伝搬
23	⑦-3.次世代宇宙・衛星システムに必要なセキュリティ技術	⑦セキュリティ
24	⑦-5.ワイヤレス電力伝送に必要なセキュリティ技術	⑦セキュリティ
25	④-2.長距離伝送化技術	④電力伝送
26	⑧-3.高周波デバイス技術	⑧デバイス
27	⑤-1.高精細映像伝送技術	⑤映像伝送
28	③-4.ネットワーク・クラウド連携技術	③センシング/IoT
29	②-3.光通信技術	②宇宙・衛星通信
30	⑨-1.アンテナ技術	⑨アンテナ・伝搬
31	⑨-2.伝搬計測/解析技術	⑨アンテナ・伝搬
32	⑧-4.テラヘルツを使った通信技術	⑧デバイス
33	⑨-5.超多素子アンテナ技術	⑨アンテナ・伝搬
34	⑤-2.立体映像伝送技術	⑤映像伝送
35	⑧-2.デジタルデバイス技術	⑧デバイス
36	⑤-3.ユーザインタフェースの高度化技術	⑤映像伝送
37	⑤-4.ワイヤレスと BMI との連携技術	⑤映像伝送

5. 技術ロードマップ

技術ロードマップの線表の凡例を図 5.1 に示す。上部に将来必要となるシステムあるいは将来の技術動向を示し、下部に研究開発すべき技術を示す。対応している将来システムと詳細技術は同一の下地（黄色/赤色）で表示してある。なお、グラデーションで示した詳細技術は、将来システム 1 から将来システム 2 へ長期的な対応が必要な技術を表している。詳細技術の左端が当該技術の研究開発開始時期を示し、右端が当該技術を利用した製品の要リリース時期を示す。

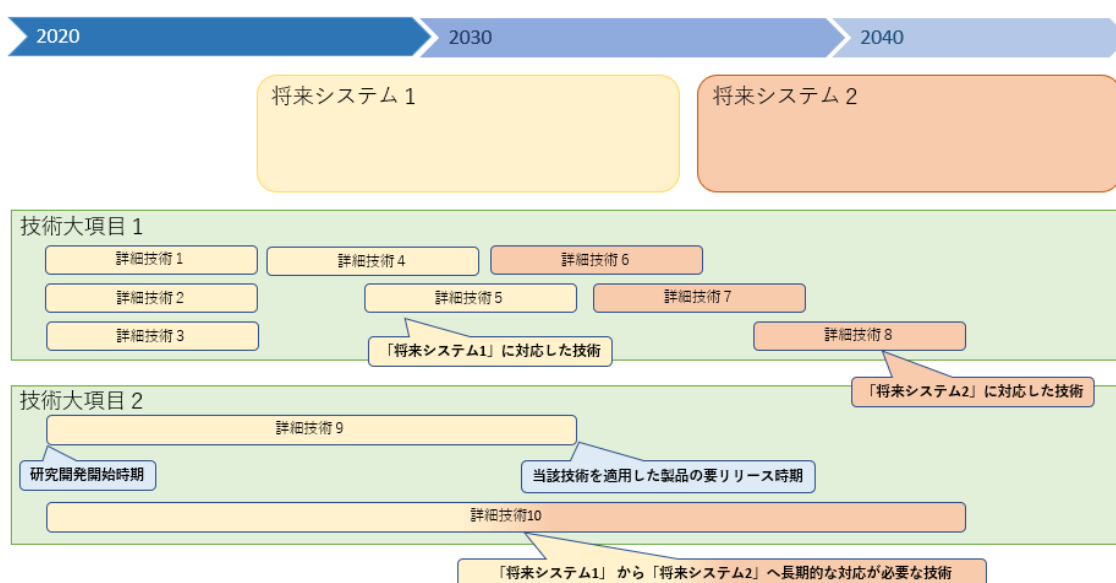


図 5.1 技術ロードマップの凡例

以下、9つの分野ごとに技術ロードマップを示す。

- ① 移動通信分野
- ② 宇宙・衛星通信分野
- ③ センシング/IoT 分野
- ④ 電力伝送分野
- ⑤ 映像伝送分野
- ⑥ モビリティ分野
- ⑦ セキュリティ分野
- ⑧ デバイス分野
- ⑨ アンテナ・伝搬分野

5.1 移動通信分野

執筆： 大槻 知明（慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 教授）

執筆協力：佐和橋 衛（東京都市大学 知識工学部 情報通信工学科 教授）

執筆協力：小川 将克（上智大学 理工学部 情報理工学科 教授）

5.1.1 将来動向

現代社会において、通信は社会インフラとして生活に不可欠な存在になっている。音声などに加え、様々なデータが有線・無線を介してやり取りされている。最近では、2019年に一部サービス開始が予定されている第5世代移動通信方式(5G)が注目されている。以下では、移動通信分野の将来動向をまとめるにあたり、日本では2019年にトライアルサービス、2020年に本格サービスがスタートする第5世代移動通信方式(5G)について、まず簡単にまとめた後、移動通信の将来動向として、5Gの各種技術の発展及び次世代の移動通信技術についてまとめる。

第5世代移動通信方式(5G)は、現在の移動通信方式(4G)を発展させた移動通信方式で、超高速(eMBB: enhanced Mobile Broad Band)、多数接続(mMTC: massive Machine Type Communication)、超低遅延(URLLC: Ultra Reliable and Low Latency Communication)といった特徴を持つ。超高速として、基地局からの下り通信では、最大20Gbpsと、現在の4Gの約100倍の伝送速度となり、例えば2時間の映画を3秒程度でダウンロードできる。また、IoT(Internet of Things)では、人だけでなくセンサやモノなど、ありとあらゆるものがモバイルネットワークにつながることを期待されているが、5Gでは接続可能なデバイス数が1平方キロメートルあたり100万と4Gの10倍に進化する。さらに、5Gでは、自動運転や工作機械・ロボットの遠隔操作などのアプリケーションが期待されており、それを実現するために、無線区間の通信遅延を1msと、4Gに比べて1/10に縮める。これによって、例えば自動車が時速100kmで走行している場合、ブレーキの始動遅延を数msまで短縮できる。

このように、5Gでは、4Gと比べ大幅に性能が改善され、それによって多種多様なアプリケーションの実現が期待されている。このような性能改善を実現する主要技術の一つにMassive MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)と呼ばれる技術がある。MIMOとは、送信側・受信側双方に複数アンテナを用いて、高速伝送または高信頼通信を実現する技術である。MIMOを使うと、複数のデータを同じ時間に同じ周波数を用いて伝送できるため、高い伝送速度を実現できる。例えば、送受信機で各4本のアンテナを用いるMIMOシステムは、各1本のアンテナしか用いないシステム(SISO: Single-Input Single-Output)に比べ、最大で4倍の伝送速度を達成できる。そのため、高速無線LANや4Gなど、最近の多くの無線通信システムで用いられている。これまでのMIMOでは、送信機や受信機で用いられるアンテナは、10本以下であった。これに対して、Massive MIMOでは、基地局に100本以上のアンテナを装備し、それによってユーザに向けて鋭いビームを形成し、基地局間の干渉を低減して高い伝送速度を実現する。

また、5Gでは、IoTのように非常に多くのセンサなどがモバイルネットワークに接続されるが、その実現には、Massive MIMOの他に、制御チャンネル容量の向上を可能とする上りリンクの非直交多元接続(NOMA: Non Orthogonal Multiple Access)技術や、データ送信の際に、事前許可が不要なチャンネルアクセス方法などの技術が重要である。

前記したように、5Gでは、自動運転や工作機械・ロボットの遠隔操作などのアプリケーションが期待されているが、その実現にはURLLCが重要である。基地局と端末間でデータを送信する際、無線リソース割り当てのスケジューリングを行う。5Gでは、その伝送時間間隔を短くすることでデータ送受信時の待ち時間を短くしている。また、URLLCの実現には、モバイルエッジ技術も重要である。

5.1.2 次世代ワイヤレスシステム

移動通信方式は、約 10 年で世代が進化している。そのため、総務省や携帯電話事業者、携帯電話機器メーカー、大学など様々な機関で 2030 年以降の移動通信方式に関する検討が既に始まっている。総務省は、平成 29 年 11 月から「電波有効利用成長戦略懇談会」を開催し、公共周波数の有効利用推進方策に加えて、今後の人口減少や高齢化等の社会構造変化に対応するための電波利用の将来像やそれらの実現方策について検討した。そして、その検討結果を、「電波有効利用成長戦略懇談会 報告書」としてまとめている。その中で、2030 年代に目指すべき電波利用社会の目標として、以下の 5 つが示されている。

1. Sustainability 持続可能性を向上する
2. Open Innovation 未来への成長エンジン
3. Knowledge 知識を結集する
4. Inclusion 多様な人材が社会に参画する
5. Empowerment 全ての人を力づける

さらに、このような電波利用社会の 5 つの目標を実現するため、2030 年代に実現すべき 7 つの次世代ワイヤレスシステムが提言されている。

1. Beyond 5G システム
2. ワイヤレス IoT システム
3. 次世代モビリティシステム
4. ワイヤレス電力伝送システム
5. 次世代衛星利用システム
6. 次世代映像・端末システム
7. 公共安全 LTE

例えば、Beyond 5G システムでは、双方向での超大容量×超大量接続×超低遅延のネットワークや、通信モジュールの偏在化に基づく端末を介さない無意識な通信、高速な移動体の遠隔操作や完全自律型ロボット等の普及、ネットワークのパーソナル化などがイメージされている。それらの実現には、5G で実現される各特性を、さらに改善する必要がある。

上記のような電波利用社会を実現するためには、以下のような技術が必要と考えられる。

- ① 超大容量化技術
- ② 超大量接続技術
- ③ 超低遅延技術
- ④ 高周波帯通信技術
- ⑤ その他技術

5.1.3 将来無線で必要な諸技術

以下では、各技術について、期待される技術の詳細について示す。

①-1 超大容量化技術

(ア) 超多数アンテナの Massive MIMO 技術

開発時期：2020 年、必要時期：2025 年

5G 方式までは、1 Hz 当たりの情報ビット数、すなわち周波数利用効率を向上するために、多値変調の変調多値数の増大や、Massive MIMO のように MIMO 技術のアンテナ数の増大を行ってきた。多値変調に関しては、アクセス回線では、既に 256QAM (Quadrature Amplitude Modulation) が採用されており、1024QAM の実用も検討されている。そのため、さらなる多値化は、重要ではあるが、その効果は大きくないと考えられる。さらなる超大容量化に関しては、Massive MIMO のように、特に、基地局のアンテナ数を増大して、指向性ビーム（ビームフォーミング）によるマルチユーザ多重、MIMO 多重によるユーザ当たりのデータレート（周波数利用効率）の増大が有効であると考えられる。基地局のアンテナ数をさらに増大した場合、移動するユーザ端末に対する高速・高精度なビーム生成法（ビームマネージメント）を少ないオーバーヘッドで実現することが技術的課題であると考えられる。また、周波数スペクトルの高周波数化に伴い、カバレッジを確保するためにユーザ端末にも指向性ビームが適用されることが考えられる。そのため、基地局の指向性ビーム送信、受信に対応したユーザ端末の高速・高精度なビーム生成法（ビームマネージメント）も技術的課題であると考えられる。その際、基地局と端末間の信号のやり取りを、量的・時間的に減らすことも技術的課題であると考えられる。

(イ) 分散MIMO技術

開発時期：2020 年、必要時期：2025 年

上記したように、大容量化技術として、超多数アンテナのMassive MIMO技術は有効な技術と考えられる。帯域幅や送信電力には成約がある中で、大容量化、すなわちeMBBを高度化するには空間多重度を上げるしかない。しかしMIMOのアンテナ素子数をいくら増やしても、多重数は伝搬路のパス数で抑えられる。素子数の増加は同時接続数には有効だが、端末当たりのパス数を増加させるには、端末から見た基地局アンテナ方向が360度全方位に一樣分散する、分散MIMOが有効である。特に見通し伝搬が支配的なミリ波帯ではなおさらである。分散MIMOは設備投資の点で課題もあるが、例えば、一部の高トラフィックエリアに限定して導入するなど現実的と考えられる。それ以外のエリアでも、さらなる多素子化が有効である。狭ビームの指向性利得やダイバーシティ利得によりSNR (Signal to Noise Power Ratio) が向上するほか、遅延分散も軽減されるからである。空間多重度の向上には、エリア単位の「アンテナ密度」の向上が必要である。また、5Gで導入が期待されるNOMAは、MIMOと一体の非線形処理による空間多重技術として発展することが期待される。

(ウ) 新波形技術

開発時期：2020年、必要時期：2025年

“波形”は、次世代通信の物理層およびMAC層を設計するための、重要な設計基準である。理想的な“波形”は、以下の要件を満たすように検討する必要がある。

- (1) 高いデータレート向けの高いスペクトル効率および利用可能なスペクトラムの効率的な使用
- (2) 効率的なパワーアンプの設計を可能にする、低いピーク対平均電力比 (PAPR)
- (3) モビリティ確保のためのドップラーシフトに強い波形。
- (4) 非同期通信のサポート。

LTE (Long Term Evolution) およびLTE-Advancedの波形として、OFDMAおよびSC-FDMAの両方が選択されている。Gaborの "Theory of Communication"において、理想的には、OFDMのようなマルチキャリアシステムが、以下の要件を満たすべきであるということが述べられている。

- a) サブキャリアは、受信機をできるだけシンプルに保ち、そしてキャリア間干渉を可能な限り低く保つために、時間および周波数において互いに直交している。
- b) 伝達関数は、時間および周波数において、十分に（広がり無く、局所的に存在するように）ローカライズされる。これは、マルチパス伝搬（時間拡散）およびドップラーシフト（周波数拡散）から、キャリア間干渉 (ICI) に対しての符号間干渉 (ISI) に対する耐性を提供している。低レイテンシを可能にするためには、時間

的にローカライズが必要である。

c) 最大スペクトル効率

しかしながら、理論的に証明されているように、この3つの要件を同時に満たすことはできない。言い換えれば、3つのうちの2つしか得ることができない。これら要件を満たしつつ、次世代移動通信に適した波形を設計することが必要である。

(エ) 非直交多元接続・非直交チャネル多重技術

開発時期：2020年、必要時期：2025年

LTEおよびLTE-Advancedで、同一セル内の時間及び周波数領域の直交リソースをユーザに割り当てる多元接続技術が採用されており、さらに、周波数利用効率を向上するためには、NOMA、FTN (Faster-than-Nyquist)、非直交FDM等の非直交チャネル多重技術の適用や、それら技術の高度化も期待される。

(オ) OAM (Orbital Angular Momentum)多重伝送技術

開発時期：2020年、必要時期：2025年

OAMとは、電波の進行方向の垂直平面上で位相が回転するように表される電波の性質の一つで、この位相の回転数をOAMモードと呼ぶ。OAMの性質を持つ電波は、同一位相の軌跡が進行方向に対して螺旋形状になる。OAMの性質を持つ電波は、送信時と同じ位相の回転数を持った受信機でないと受信できない。そこで、異なるOAMモードを持つ複数の電波を重ね合わせても、それぞれのOAMモードに合った位相の回転数で受信できる受信機を用意すれば、互いに干渉することなく分離することができる。この特徴を利用し、複数の異なるデータを伝送する技術をOAM多重伝送技術と呼ぶ。このOAM多重伝送技術を用いることで、大容量化を実現することが期待される。また、OAM多重伝送に、現在広く利用されているMIMO技術を統合することによって、異なるOAMモード間で互いに干渉しない性質を維持しつつ、複数セットのOAM多重伝送を同時に行うことが可能となり、超大容量の多重伝送の実現が期待される。

(カ) 高周波数帯活用技術

開発時期：2020年、必要時期：2025年

次世代移動通信での大容量化には、広い周波数帯域を利用した高速伝送が必要である。そのためには、ミリ波、サブテラヘルツのような、さらに高い周波数帯が利用できるよう周波数帯域の確保と技術開発が必要である。高周波数帯は基地局と端末間の通信に直接利用す

る他に、多数展開する基地局を結ぶモバイルフロントホール回線として利用することが検討されている。固定設置された局間であれば見通し内伝搬が期待でき、高周波数帯の利用に適しており、基地局展開コストの削減、柔軟性の向上が実現できる。また、高周波数帯活用際には、多数の周波数スペクトルのマルチバンドキャリアアグリゲーション技術、6GHz帯以下とミリ波帯とのシームレスな切替制御も重要になると考えられる。

(キ) ヘテロジーニアスネットワークにおける高速・高効率無線リソース制御技術

開発時期：2020年、必要時期：2025年

カバレッジを保証しつつ、不均一なトラフィック分布を効率的にネットワークに收容するためには、マクロセルと小セルのカバレッジが2重レイヤになっているヘテロジーニアスネットワークが必須と考えられる。トラフィックが一層増大する将来方式では、小セルの数が飛躍的に増大すると想定される。小セル基地局にはRRH (Remote Radio Head)のみを設置し、レイヤ1からレイヤ3の処理は、マクロセル基地局で集中制御する方式が、無線リソース制御の観点から有効と期待される（少なくとも、レイヤ3制御はマクロセルサイトに設置）。これらを実現するためには、マクロセル・小セル間、複数の小セル間の協調を含む、多数の小セルのリソース（周波数帯域、送信電力）を高速・高効率に割り当てる無線リソース制御技術が必要であると考えられる。

(ク) 位置情報と電波MAPに基づくダイナミックスペクトル制御技術

開発時期：2020年、必要時期：2025年

地上マイクロ波無線（C帯）など、地域によって未使用な帯域は至るところにある。未使用帯域をセンシングで検知することは完全にはできない。即ち、送信場所で検知対象システムの受信機の電波環境を完全に検知するのは現実的でない。そのため、実際に測定して地域ごとデータベース（DB）を作りアップデートしていき、それを基に、空き周波数を有効に活用する技術が有望と考えられる。技術課題として、以下が挙げられる。

- ・ 空き周波数の探知技術の開発：既存の無線システムの使用状況を正確に把握し、一定の面積や時間単位で高精度に空き周波数を見つけ出す技術等の開発
- ・ 共用周波数の管理技術の開発：見つけ出した空き周波数を混信なく瞬時に割り当てるためのアルゴリズム等の開発
- ・ 共用周波数の利用技術の開発：高度な周波数共用を実現するために無線システムが具備すべき干渉軽減技術や干渉回避技術等の開発

①-2 超大量接続技術

(ア) 制御チャンネル情報を不要とする制御チャンネル設計・アクセス制御技術

開発時期：2020年、必要時期：2025年

現在の携帯は、端末1台ごとに管理している。例えば、CDMA（符号分割多元接続）では、1台ごとに送信電力を制御している。また、LTEでは、送信タイミングを1台ごとに制御している。将来無線通信で想定しているような現在の100倍程度の超多数の端末だと管理が非常に困難になる。さらに、IoT（Internet of Things）端末などで1か月に1回しかアクセスしない端末などが混在している状況では、同一管理はますます困難になる。そのため、将来無線通信で期待される超大量接続技術には、基地局からの許可がなくても制御できるような技術が必要である。例えば、データ送信の際に、事前許可を不要とするチャンネルアクセス方法（グラントフリーアクセス：Grant free access）が重要になると考えられる。

(イ) 制御チャンネル容量の向上技術

開発時期：2020年、必要時期：2025年

超大量接続を実現するためには、制御チャンネル容量の向上技術も重要である。そのためには、超大容量化技術でも取り上げたNOMAが重要になると予想される。

(ウ) ユーザ端末からの受信チャンネル品質(CSI: Channel State Information)のフィードバックとCSI測定のための「上りリンクリソース割り当て」

開発時期：2020年、必要時期：2025年

端末数が膨大になった場合、端末からのCSIのフィードバック(FDDの場合)、CSI測定のための上りリンクのリソース割り当て(TDDの場合)が課題であると考えられる。

(エ) 拡散系列技術

開発時期：2020年、必要時期：2025年

上りリンクは、同一セル内の複数ユーザ端末間是非同期受信(LTEの上りリンクのようにユーザ間でタイムアライメントは行わない)になると想定される。そのような場合、非同期受信の膨大な数の端末の物理チャンネルの相関の低い(拡散)系列が必要であると考えられる。

(オ) デバイス管理・認証技術

開発時期：2025年、必要時期：2030年

大量のデバイスが接続するシステムでは、デバイスからネットワークに接続してよいか

の判断に、軽微かつセキュアな認証プロトコルが必要である。

(カ) 通信デバイス低消費電力化技術

開発時期：2025 年、必要時期：2030 年

超大量接続技術だけではないが、通信デバイス低消費電力化は将来無線通信にとっても非常に重要な技術である。将来の社会インフラにおいて、ユーザの利便性を飛躍的に高めるものとして、世界のあらゆるモノがネットワークに接続する社会が期待されている。このような社会の実現には、ネットワーク接続するデバイスが、有線による電源供給を要するようでは導入の大きな制約となる。そこで、電池等の容量の小さな電源デバイスを用いても、より高速な通信を長期間持続可能な伝送方式等の技術進展が必要とされる。

①-3 超低遅延技術

(ア) エッジコンピューティング技術

開発時期：2020 年、必要時期：2025 年

IoT の普及に伴い、より多くのデバイスがネットワークを通じて接続されるようになる。多数の IoT 端末からのデータをネットワークの向こう側にあるクラウドサービスに転送して処理する場合、ネットワーク遅延が生じる。また、通信障害の可能性も高くなる。そのため、リアルタイム性や高信頼性といった要求を満たせないことが予想される。また、通信コストの点でも、望ましくない。

データを収集する端末機器や、そこから通信経路の点で近い場所で処理するエッジコンピューティング技術は、超低遅延技術として非常に重要な技術と言える。また、負荷分散やトラフィックの混雑解消などの点でもメリットがあるといえる。さらに、データを 1 箇所に集めるのではなく、分散した箇所で集めて処理することで、セキュリティ面でもメリットがあると言える。

(イ) 初回リソース割り当ての低遅延化技術

開発時期：2020 年、必要時期：2025 年

超大容量化技術でも述べた技術の繰り返しになるが、リソース制御は、超低遅延化技術でも重要である。下りリンクは、基地局がリソース制御を行うため、リソース割り当ての低遅延化は、基地局の割り当て情報の多重法により決まる。一方、上りリンクは、上りリンクにおいてスケジューリング要求情報を送信して、下りリンクで基地局から Grant 信号（割り当て情報）を送信し、ユーザ端末が Grant 信号（割り当て情報）を受信したら、上りリンク

のデータチャネルを送信できる。従って、低遅延化を実現するためには、基地局からの Grant 信号（割り当て情報）を送信することなく、ユーザ端末が予め決められたリソース（時間、周波数、コード）の候補の中の1つを用いて上りリンクのデータチャネルを送信する Grant-free access が必要である。Grant-free access では、複数ユーザ間の衝突が生じるため、低相互関係列、衝突を前提としたアクセス制御が技術課題になると考えられる。

(ウ) リソース及び信頼性のダイナミック制御技術

開発時期：2020 年、必要時期：2025 年

信頼性と低遅延は、一般に両立が困難である。高信頼にするためには、誤り制御（FEC、ARQ など）が必要であり、低遅延が困難になる。すなわち、一般にリソースと信頼性の間はトレードオフの関係である。将来無線では、その間のダイナミックな制御が必要である。

(エ) AIに基づく受信機技術

開発時期：2020 年、必要時期：2030 年

上記したように、高信頼にするためには、誤り制御（FEC、ARQ など）が必要であるが、低遅延が困難になる。そこで、例えばAI技術を用いて、信号処理を大幅に簡略して、所望信号を復元する受信機技術の開発が期待される。

(オ) 非IPプロトコル技術

開発時期：2025 年、必要時期：2030 年

超低遅延技術では、プロトコルを変えることが必要になることも予想される。その候補として、非IPプロトコル技術が考えられる。IPプロトコルと比較して、設計自由度が増すため、例えば超低遅延を実現するプロトコル設計も可能となる。

(カ) ドローン等を用いた3次元ネットワーク構成技術

開発時期：2020 年、必要時期：2025 年

3次元的にネットワークを構成して、遅延を小さくする技術も期待されている。アドホック的なネットワークなどで、例えば、地上で5ホップ、10ホップと重ねると遅くなる。ドローンなどの飛行体が常時どこかにいるような環境では、1ホップで地上より低遅延に接続できる可能性もある。そのため、3次元的なネットワーク構成も超低遅延技術として、一部で期待される。

①-4 高周波帯通信技術

(ア) ミリ波帯やさらなる高周波数帯デバイス開発技術

開発時期：2020年、必要時期：2025年

ミリ波帯を用いる第5世代移動通信システム（5G）が世界的に実用化されつつあるが、次世代以降の移動通信システムでは、さらに高い周波数を利用することで、より高速な伝送を実現する方式が提案されている。一般に、ミリ波やさらに高周波のテラヘルツ波のデバイスは、低周波数のものと比較して高額で、雑音等の性能も悪いのが現状である。今後の利用を促進するためには、低価格化と高性能化を達成できる技術開発が期待される。例えば、28GHz/60GHz/80GHz デバイスは熱効率が悪く、高効率化が必須である。5GHz帯、28GHz帯、40GHz帯を活用する小型・低コスト通信機器（特にRFフロントエンド部分）の開発技術も重要である。さらに、可視光などの光も、一部の領域では使われることが予想される。そのため、可視光などを用いる通信技術・デバイス技術の開発も重要である。

(イ) ミリ波帯やさらなる高周波数帯通信技術

開発時期：2020年、必要時期：2025年

ミリ波やさらなる高周波数では、距離減衰が大きく伝播距離が短くなる。そのため、非常に狭いエリアでの通信に適用されることが予想される。その際、人体遮蔽の影響など、高周波数帯の特性を考慮した通信技術の開発が重要である。

(ウ) RF-CMOS等のMMIC技術

開発時期：2025年、必要時期：2030年

安価な端末には、CMOSが適していると考えられる。RF-CMOSの研究開発レベルでは、200GHzにも対応できている。サブテラヘルツ領域はCMOSでシリコンと予想される。微細化技術はシリコンが一番進んでいる。ただし、高効率大電力増幅器は、シリコンは難しいと予想される。ミリ波帯やさらなる高周波数帯用高効率大電力増幅器が、重要となってくる。

(エ) マルチバンドアンテナ技術

開発時期：2025年、必要時期：2030年

送信帯域の一層の広帯域化を実現するためには、マルチバンドのキャリアアグリゲーションが必要であると予想される。一方、特にユーザ端末は、MIMO用に複数のアンテナを実装する必要がある。設置スペースの制約により、より広帯域の周波数帯スペクトル範囲の

マルチバンドの高利得アンテナの開発が必要と思われる。

①-5 その他技術

(ア) 深層学習(Deep Learning)を用いる無線リソース制御技術

開発時期：2020年、必要時期：2030年

トラヒックの分布は1日間、週単位、月単位、年単位で各セル固有の分布を有する。ネットワークの大容量化は重要であるが、一方、ネットワーク（基地局、上位局）の電力効率の低減も必要な課題である。トラヒック分布を学習することにより、セルの場所、日時で最適な基地局のカバレッジの提供、リソース割り当てを行うことにより、電力効率の低減を満たしつつ、大容量化無線アクセスネットワークを提供することが期待される。また、複雑化するネットワーク全体を所望の規範に関して最適化する無線リソース制御は非常に複雑である。そのような制御には深層学習が期待される。

(イ) 深層学習を用いる復調（等化）・復号技術

開発時期：2020年、必要時期：2030年

陸上移動通信の見通し外(NLOS: Non Line of Sight)のマルチパスフェージングチャネルにおける遅延化干渉に起因する波形歪みの等化は、将来無線に必須である。従来、時間領域の1タップ/シンボルの同期検波、周波数領域等化等が採用されてきた。従来の等化器は、時間領域あるいは周波数領域処理いずれの場合においても、パイロット信号（あるいは参照信号）を用いてチャネル応答を推定し、チャネル応答の推定値を用いて等化重みを生成する方法が用いられている。この場合、受信電力レベルが低い場合には、復号誤りが生じてしまう。深層学習を用いて伝搬路のフェージング複素包絡線を学習し、ビットの復号パターンを推定できれば、復号誤りを低減することができる。深層学習を組み合わせた等化技術も高信頼化の技術候補になると期待される。同様に誤り訂正復号器も、復号誤りのパターンを深層学習により学習することにより、復号誤りを予測できるようになると期待される。従来は、適応アルゴリズムを用いてきた物理レイヤの復調・復号処理も、将来は、深層学習を用いてフェージング変動を学習する復調・復号処理が導入されてくることが期待される。

(ウ) AIを用いたネットワークオペレーション技術

開発時期：2025年、必要時期：2030年

今日、ネットワーク性能が日増しに高くなっていくと同時に、劣化リスクに対する原因が多様化してきている。例えば仮想化技術により機能が複雑化したり、トラヒック変動が

激しくなることで、いつどのような障害が発生するかが読みづらくなっている。原因の多様化は、トラブルシューティングを困難にしている。

しかし、一方でサービスに対する要求水準は高く、故障が発生してから原因を探り、対応策を練り、そして復旧を行っていくのでは、時間がかかりすぎてしまう。そこで、AI技術を用いた故障対応技術の高度化が期待される。また、故障対応技術以外にもネットワークオペレーションの多くの領域で、AI技術を用いた簡易化・高度化が期待される。その際、各対応がブラックボックス化しないように、説明可能AI (explainable AI)技術を開発し、適用していくことが重要である。

(エ) ソフトウェア無線・コグニティブ無線技術

開発時期：2025年、必要時期：2030年

デバイスがシステム要求条件を満たすようになってきた場合、最新システムをソフトウェア無線で実現できるようになる。ソフトウェア無線が実現できれば、より柔軟でオーダーメイドな無線リンクの提供や、超大量無線端末のフィールド上でのバージョンアップも容易になる。

(オ) 周波数割当ての抜本的見直しを可能とする技術、柔軟化技術

開発時期：2030年、必要時期：2040年

将来、既存の周波数割当てに引きずられないような、その時点で最適な周波数割り当てが必要になることも予想される。そのような場合、システムは一気に周波数帯を変えられないので、それを支える技術開発が必要になってくる。そのような技術の一つは、全バンドRF技術である。

(カ) 無線ネットワーク仮想化・再構築化技術 (Cloud-RAN 的)

開発時期：2020年、必要時期：2025年

情報システムでは仮想ネットワーク、仮想マシン、コンテナなどの仮想化技術が発展し広く用いられている。仮想化技術により、ネットワーク運用が飛躍的に単純化(ソフトウェア化)している。無線では、移動網でC-RANが提唱されているものの無線独自の信号処理のリアルタイム性要求などから普及は進んでいない。今後、ハードウェアやプロセッサの性能が良くなると、性能的なボトルネックが解消され、無線通信でも仮想化が進展することが予想される。

(キ) 高精度位置測位技術

開発時期：2025 年、必要時期：2030 年

屋内・屋外で、高精度な位置情報を取得できれば、リソース制御を始めとして、様々な領域でそれを用いた高機能化が期待される。しかし、無線通信システムによる高精度位置測位は、まだ実現されておらず、今後の技術開発が期待される。

5.1.4 将来必要となる技術の世界の動向と日本のプレゼンス

上記した各種技術に関して、世界の動向は日本の動向と同じと考えられる。日本のプレゼンスに関しても、全般的に決して低くはないと思われる。特に高周波数帯技術などは、日本が強い分野と言える。しかし、そのような分野でも、世界とのレベル差は縮まっている。また、AI 分野を筆頭に、特に各技術分野に携わる研究開発者の数が、世界と比べても圧倒的に少ないと思われる。最初に述べたように、無線通信は重要な社会インフラであり、それを支える技術で世界に遅れないためにも、上記技術領域は、AI 分野並びにエレクトロニクス分野を筆頭に、国が業界や学会と一緒に取り組むべきである。特に、それら分野の人材育成並びに社会応用は、国が今以上に注力するべきである。

5.1.5 技術ロードマップ

将来システムと詳細技術の技術ロードマップを図 5.1.1 に表示する。

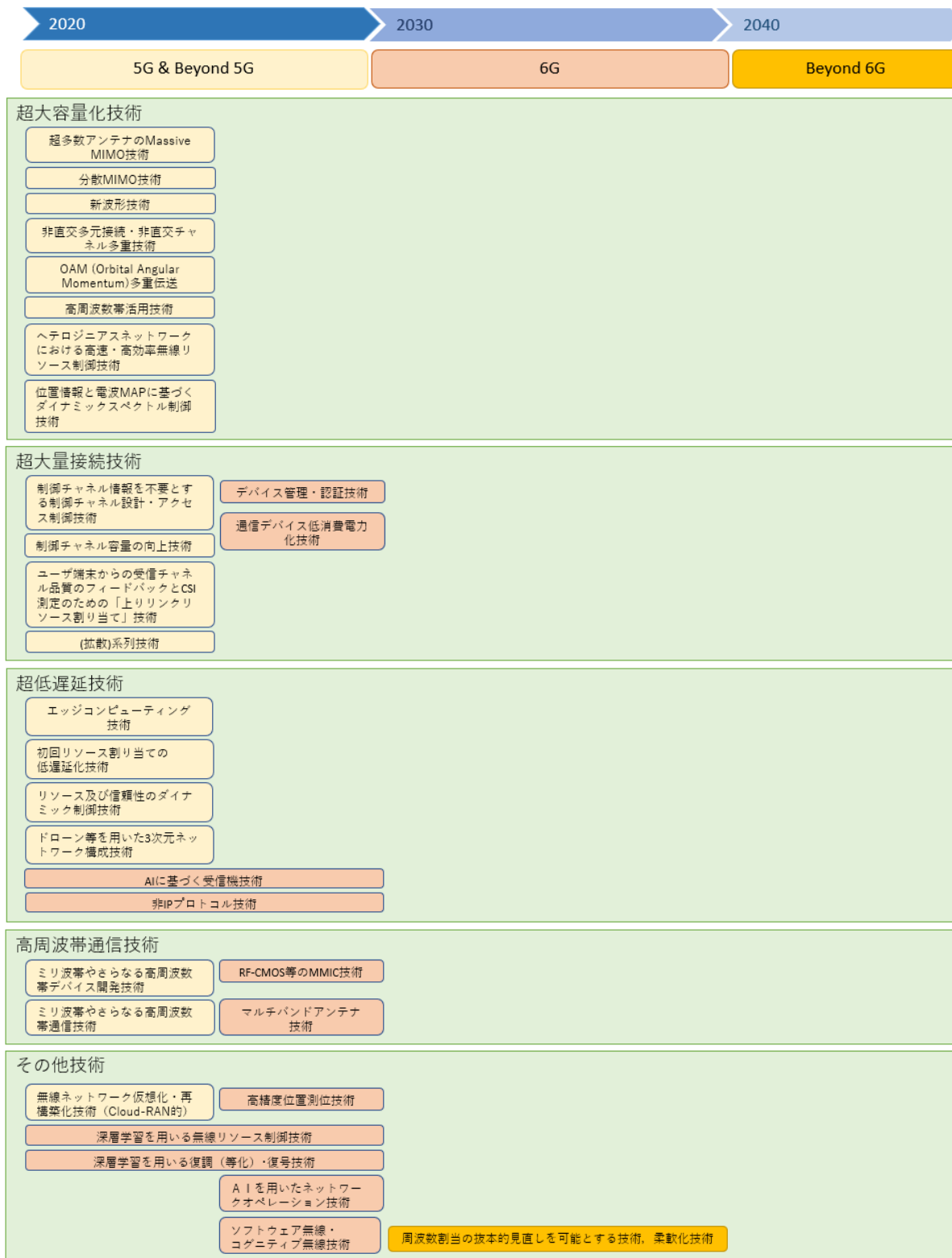
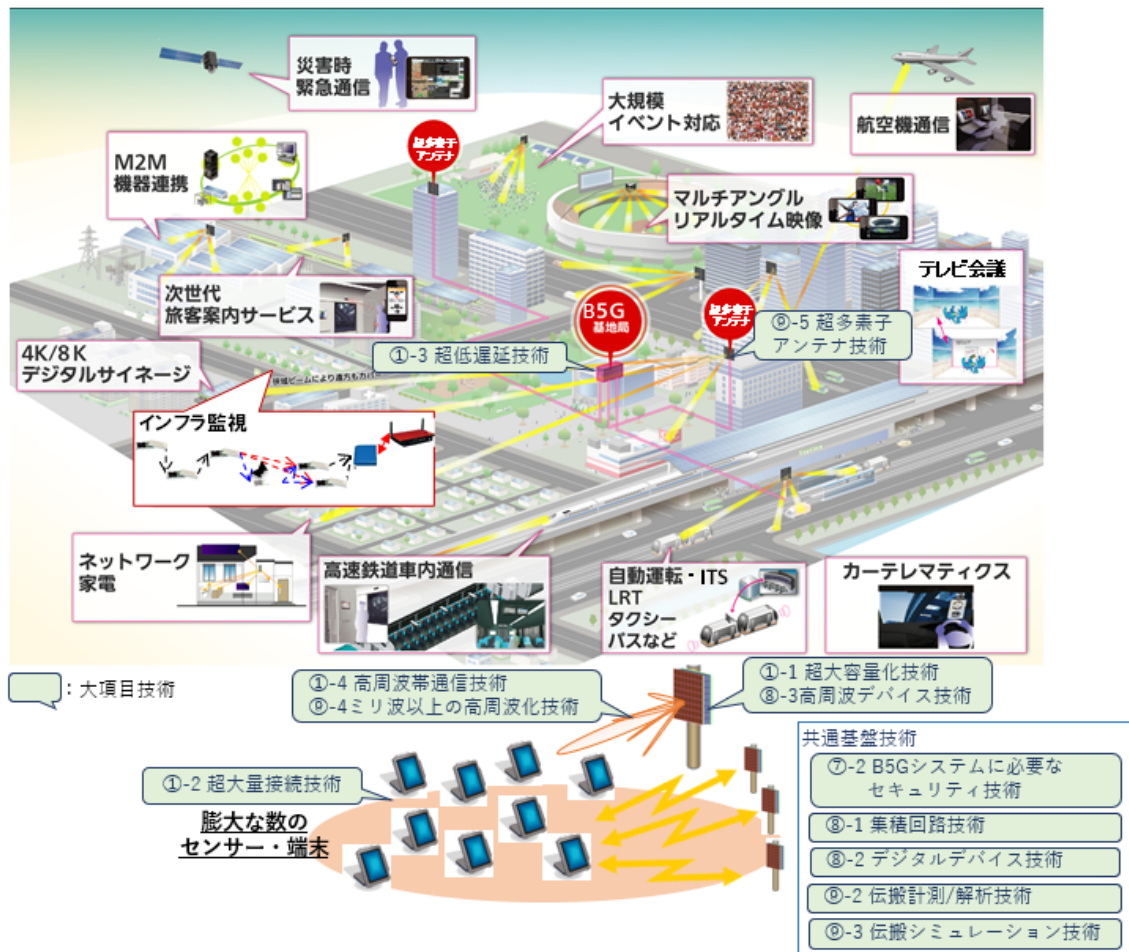


図 5.1.1 移動通信分野の技術ロードマップ

5.1.6 将来システムのイメージ図

将来システムのイメージ図を図 5.1.2 に表示する。



電波政策2020懇談会報告書（2016年7月）を基にサイバー創研にて作成
 図 5.1.2 移動通信分野の将来システムイメージ図

5.2 宇宙・衛星通信分野

執筆：梅比良 正弘（茨城大学 大学院 理工学研究科 教授）

執筆協力：豊嶋 守生（情報通信機構 ワイヤレスネットワーク総合研究センタ 室長）

執筆協力：山下 史洋（NTT アクセスサービスシステム研究所 グループリーダー）

5.2.1 将来動向

5.2.1.1 衛星通信システムの展望

衛星通信システムは広域性、同報性、即応性、耐災害性という特徴があり、船舶や航空機などを対象とする広域の移動体通信、災害地への迅速な通信回線確保等に利用されてきている。過去には、国際通信サービスは主に衛星通信により提供されていたが、1990年代以降の高速光ファイバ網の急速な発達、低コスト化により、衛星通信システムの適用領域は限定的になっていた。2010年代に入り、世界の衛星通信事業では、広帯域を利用できる Kaバンドを利用し、多数のマルチビームと中継器を装備した HTS (High Throughput Satellite) が注目されており、例えば米国 Via Sat は全体で 140Gbps のスループットが提供可能とされている。将来は、Tbps クラスの高スループット化を目指したシステム開発が進められると考えられる。

衛星通信システムの基本的な役割は、有線、無線に関わらず、地上系の通信システムでは経済的にカバーできないエリアにおいて、通信・放送サービスを提供することであり、今後も衛星システムと地上システムは互いに補完しあい、地上システムに比べて経済的に優位なエリアやアプリケーションで衛星システムが利用される。一般的に、ユーザ数が多く人口密度の高い、大量のトラフィックが発生するエリアでは地上システムが適しており、ユーザ数が少なく人口密度の低い、トラフィックも比較的少ないエリアでは衛星システムが適するとされている。衛星、地上システムの技術進歩、アプリケーションに応じて、衛星と地上のどちらのシステムを利用するかが決まる。将来は、IoT (Internet of Things) の言葉が示すように、「人」に加えて「モノ」が通信サービスを利用するため、ユーザ、トラフィックの地理的分布が大きく変わる可能性があることに留意が必要で、広域のサービスエリアを広くカバーできる衛星通信の適用形態も変わると考えられる。

一方、将来のデジタルトランスフォーメーションを支える基幹通信システムとして、第5世代移動通信システム (5G) が注目されている。5G では、従来の「人」が利用する高速・大容量通信だけでなく、「人」に加えて「モノ」が通信を利用するため、様々なアプリケーションに適用可能とするため、下記の3つのサービスカテゴリのサポートが要請されている。

- ・ eMBB (enhanced Mobile Broadband) : 超高速・大容量
- ・ mMTC (massive Machine Type Communications) : 多数接続
- ・ URLLC (Ultra Reliable and Low Latency communications) : 超高信頼・低遅延

衛星通信も上記の3つの利用シナリオに対応が求められる。eMBB は HTS の適用により対応可能であるが、将来は mMTC と URLLC にも対応可能な衛星通信技術の開発が必要とな

る。

5.2.1.2 将来の衛星通信の利用シナリオ

従来の赤道上空 36,000km に配置された静止衛星を用いる衛星通信システムでは、片道約 250ms の遅延が発生し、低遅延を実現することは物理的に不可能となる。上記の 3 つのサービスカテゴリをサポートするため、衛星システムに求められる条件として、eMBB についてはユーザ当たり伝送速度は 5G サービスに相応しい 100Mbps 程度が必要となろう。また、インターネットのトラヒックは現在も 1.46 倍/年の増加を続けており 10 年後にはトラヒックは 40 倍程度となると想定されるため、HTS も現在の 10 倍以上の Tbps 級の HTS が求められよう。

一方、URLLC については、静止衛星を用いる衛星通信システムでは対応は困難である。そこで、低遅延サービスを実現するには、従来の静止衛星を用いる衛星通信システムではなく、より低高度の無線中継局を用いるシステムとして、多数の低軌道衛星を用いる衛星通信システム（メガコンスタレーション）や、成層圏プラットフォーム（HAPS: High Altitude Platform Station）システムが注目されている。例えば、300km の低軌道に多数の小型通信衛星を配置し、仰角 45 度を確保する場合、半径は 300km であるので、伝搬遅延時間は「地上端末—衛星—基地局」で 2.4ms となり、5G システムとほぼ同等の遅延時間を実現できる。HAPS では高度約 20km の成層圏に滞空する飛行体を中継局として利用し、仰角 10 度を確保する条件では半径 100km 程度をカバーできる。伝搬遅延時間は「地上端末—HAPS—基地局」で 0.4ms となり、5G システムと同等以下の遅延時間を実現できる。

自動運転や遠隔制御などのアプリケーションでは「衛星通信（HAPS 通信を含む）による URLLC への対応」は重要である。自動運転・遠隔制御センシング等のアプリケーションでは、自動車、タンカーや貨物船などの船舶や航空機、列車などが低人口密度のエリアで利用されることも想定され、衛星通信の役割は重要になると考えられる。低遅延は eMBB においても重要な要求条件となる。これはインターネットで用いられる TCP（Transmission Control Protocol）の最大スループットが往復遅延時間（RTT: Round Trip Time）の影響を受けるためである。ウィンドサイズが 64K バイトの場合、最大スループットの理論値は、RTT 1ms で 512Mbps、RTT 10ms で 51.2Mbps になり、例えば東京—大阪間では RTT は 10~20ms になり、最大スループットは 25Mbps 以下程度になる。これを解決するには TCP のウィンドサイズを大きくする、マルチコネクションを用いる等の方法があるが、端末毎の設定変更が必要になる。静止通信衛星を用いる場合、RTT は 500ms となるため最大スループットは 1Mbps 程度になり、高速の地上ネットワークとの接続のためには、GW(Gate Way)局によるプロトコル変換が必要になる。

低遅延特性はバックボーンネットワークでも重要となる。これまでバックボーンネットワークは地上の光ファイバネットワークが主に使われているが、光ファイバでの伝搬速度は 20 万 km/s で、真空中の光の伝搬速度の 30 万 km/s の約 2/3 になる。さらに光ファイバは陸上では直線上に敷設できず、実際の敷設距離を考慮すると、遅延時間は地上の直線距離

の伝搬時間に比べ約 2 倍になる。これに対し、低軌道衛星を用いたメガコンスタレーションでバックボーンネットワークを構成した場合、衛星間光通信を行うことにより、地上の光ファイバネットワークよりも低遅延なバックボーンネットワークを構築できる可能性がある。なお、光ファイバは波長によって損失が異なり、低損失な S/C/L バンド (S:1460-1530nm、C:1530-1565nm、L:1565-1625nm) が用いられ、利用可能な帯域は約 20THz あるが、波長分散による群遅延歪が発生するため、高速伝送には遅延分散に対する等化が必要になる。衛星間光通信では、真空中を伝搬するため、可視光を含む全ての波長の光を利用できる。また、光は波長が極めて短く、高利得アンテナを小型で実現できることから、低軌道衛星のメガコンスタレーションに空間光通信を用いた低遅延なバックボーンネットワークは有望な選択肢の一つと考えられる。

5.2.1.3 将来の想定されるシステム構成と課題

衛星通信では、中継局に静止衛星、低軌道衛星、HAPS のいずれを用いるかによって、システム構成が異なる。図 5.2.1 に将来の衛星通信システムの構成を示す。図には、将来の衛星通信システムで地上

一衛星間、衛星一衛星間で電波通信と空間光通信のいずれが有望かも併せて示した。光は電波に比べて 4 桁周波数が高いことから、利用可能な帯域も 4 桁大きく高速・大容量通信

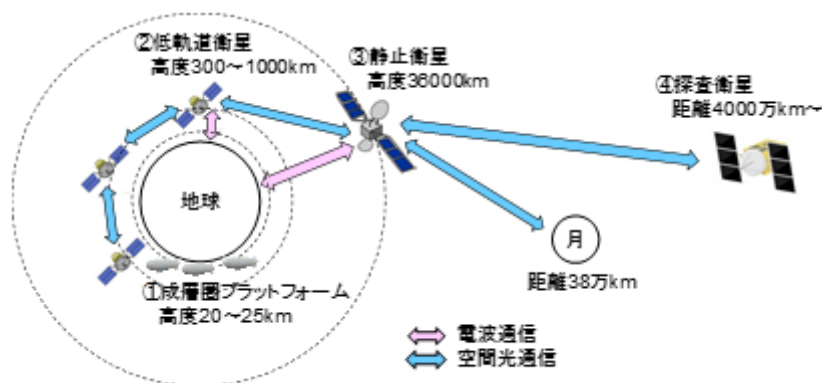


図6.2.1 将来の衛星通信システムの構成

に適する。衛星一衛星間は真空であるため、電波も光も自由空間伝搬となり、衛星間は空間光通信が有望と考えられる。一方、地上一衛星間については、空間光通信は降雨、霧、雲、大気による影響が大きく、電波通信の方が適する。高速・大容量化のためには、マルチビームを用いた周波数の空間的な再利用などの周波数有効利用に加えて、さらに高い周波数帯の開拓が重要になる。以下では、静止衛星、低軌道衛星、HAPS を用いる 3 種類のシステム構成を想定し、課題を整理する。

(1) 静止衛星を用いた衛星通信システム

静止衛星システムでは、RTT が 500ms 程度でも GW でのプロトコル変換により 10Mbps 程度までのブロードバンドサービスを提供できる。URLLC への対応は困難であるが、広いエリアで安定に通信サービスを提供可能で、今後も広く利用されると考えられる。HTS の高速・大容量化には、さらなる周波数有効利用と高周波数帯の開拓が課題となる。また、トラフィック需要に応じて帯域と送信電力を柔軟に割り当てるリソース制御も重要となる。

(1-1) サービスリンク大容量化技術

- ・日本をカバーする場合、100 ビーム以上のマルチビーム化（アンテナの大型化、ビーム数増大）とビーム間干渉の低減

- ・トラヒック需要に応じたビーム形成、帯域と送信電力を柔軟に割り当てるデジタルチャネライザ、デジタルビームフォーミング、リソース制御

(1-2) フィーダリンク大容量化技術

- ・マルチビーム化・周波数繰り返し利用による大容量化

(1-3) 高周波帯通信技術

- ・従来の Ku バンド（12～18 GHz）、K バンド（18～27 GHz）、Ka バンド（27～40 GHz）に加えて、Q バンド（33～50 GHz）、V バンド（40～75 GHz）、W バンド（75～110 GHz）の利用

- ・降雨、雲、霧、大気減衰に対するサイトダイバーシティ等の減衰対策

- ・フィーダリンク、衛星間通信での空間光通信の利用

(1-4) 高周波アンテナ、RF 回路技術

- ・マルチビームアンテナのビーム間干渉の低減、低サイドローブ化

- ・高周波送受信回路、高周波帯の高効率 HPA

(1-5) 固定衛星通信と移動衛星通信の周波数共用

- ・航空機や船舶、海上での移動衛星通信と固定衛星通信の周波数共用

(2) 低軌道衛星を用いる衛星通信システム

低軌道衛星システムの通信衛星の高度は 300～1000km が考えられる。300km の低軌道衛星で仰角 45 度の場合、半径は 300km となり、伝搬遅延時間は「地上端末－衛星－基地局」で 2.4ms、RTT は約 5ms（静止衛星の 1/100）となり、5G、LTE システムと同等の遅延時間となるため、100Mbps クラスの高速通信に加え、URLLC へも対応可能になる。しかし、低軌道衛星を多数用いるため、地球全体をサービスエリアとするグローバルシステムが前提となる。低軌道衛星間で空間光通信を行えば、全世界をサービスエリアとする低遅延の大容量バックボーンネットワークを構築できる可能性がある。低軌道衛星システムでは以下の課題が考えられる。

(2-1) システム設計・ネットワーク制御技術

低軌道衛星では、静止衛星に比べ小口径のアンテナで、同じエリア／ビームをカバーできる。高度 36000km の静止衛星と高度 1000km の低軌道衛星を比較すると、低軌道衛星は約 1/1000 のアンテナ開口面積で静止衛星と同じエリアをカバーでき、周波数再利用による大容量化が可能になる。これは地上セルラネットワークの小ゾーン化による大容量化と等価で、以下のようなシステム設計・ネットワーク制御の課題があげられる。

- ・多数の低軌道衛星を用いる衛星通信システムの設計（高度、衛星数、衛星の所要機能、地上局数等のトレードオフ）

- ・端末－ビーム間・衛星間・地上 GW 局間の接続・制御を行うネットワーク制御

- ・トラヒック需要に応じてビーム、帯域と送信電力を柔軟に割り当てるリソース制御
- ・衛星間の空間光通信におけるネットワーク制御

(2-2) サービスリンク大容量化技術

- ・所要衛星数低減・システムコスト低減のためのマルチビームアンテナ照射範囲の広域化
- ・マルチビームアンテナにおけるビーム間干渉の低減
- ・トラヒック需要に応じたビーム形成、帯域と送信電力を柔軟に割り当てるデジタルチャネライザ、デジタルビームフォーミング、リソース制御

(2-3) フィーダリンク大容量化技術

- ・マルチビーム化・周波数再利用による大容量化
- ・降雨、雲、霧、大気減衰に対するサイトダイバーシティ等の減衰対策

(2-4) 高周波帯通信技術・空間光通信技術

- ・Vバンド、Wバンドの利用
- ・低軌道衛星間通信に適用する空間光通信。地上光通信技術をベースにした搭載光中継器、光アンテナ、光ビームフォーミング、高精度指向方向制御、光・電波変換等

(2-5) 高周波回路・アンテナ技術

- ・マルチビームアンテナのビーム間干渉の低減
- ・高周波送受信回路、高周波帯高効率 HPA

(2-6) 静止衛星と低軌道衛星を用いる通信システム間の干渉軽減・周波数共用技術

- ・静止衛星システムと低軌道衛星システム間の干渉軽減・周波数共用

(3) HAPS 通信システム

HAPS 通信システムは高度 20～25km の成層圏に滞空する飛翔体を無線中継局として利用し、IMT-2000 用に 2GHz 帯、固定業務用に 31/28GHz 帯と 47/48GHz 帯の合計三つの周波数帯が割り当てられている。HAPS を仰角 10 度の条件で用いると、半径 100km 程度のセルをカバーでき、伝搬遅延時間は「地上端末—HAPS—基地局」で 0.4ms、RTT は「地上端末—HAPS—基地局」で 1ms 以下となり、5G システムと同等の低遅延時間が可能になることから、512Mbps の超高速伝送と URLLC に対応可能となる。低軌道衛星システムと異なり、HAPS システムではローカルなシステム展開、HAPS の修理・再利用が可能な点が大きく異なる。我が国全体をカバーするには、仰角 10 度の条件で 40 機程度、仰角 20 度の条件で 100 機程度の HAPS が必要になる。

HAPS 通信システムも、高速・大容量化のための周波数有効利用技術、高周波化技術に留まらず、HAPS 機能やネットワーク制御の高機能化が求められ、以下の課題が考えられる。

(3-1) システム設計・ネットワーク制御技術

HAPS は大型の飛翔体を用いるため、超マルチビームアンテナを用いたシステム構築も可能である。仰角 20 度の条件で HAPS 当たり約 400 ビームを用いる場合、セル半径は 6km

程度となり、周波数再利用による大容量化が実現できる。これは地上セルラネットワークの小ゾーン化による大容量化と等価で、システム設計・ネットワーク制御において以下の課題があげられる。

- ・ HAPS を用いる通信システムの設計
- ・ 端末ービーム間・HAPS 間・地上 GW 局間の接続・制御を行うネットワーク制御
- ・ トラヒック需要に応じてビーム、帯域と送信電力を柔軟に割り当てるネットワーク制御
- ・ 空間光通信を含む HAPS 間通信のための HAPS 搭載スイッチおよびルーティング

(3-2) サービスリンク大容量化技術

- ・ 100~400 ビーム程度の超マルチビームアンテナとビーム間干渉低減
- ・ 所要 HAPS 数低減・システムコスト低減のためのマルチビームアンテナ照射範囲の広域化
- ・ トラヒック需要に応じたビーム形成、帯域と送信電力を柔軟に割り当てるデジタルチャネライザ、デジタルビームフォーミング、ネットワーク制御

(3-3) フィーダリンク大容量化技術

- ・ マルチビーム化・周波数再利用による大容量化
- ・ 降雨、雲、霧、大気減衰に対するサイトダイバーシティ等の減衰対策

(3-4) 高周波帯通信技術・空間光通信技術

- ・ 従来の 31/28GHz 帯と 47/48GHz 帯に加えて、V バンド、W バンドの利用
- ・ HAPS 間通信のための空間光通信

(3-5) 高周波アンテナ、RF 回路技術

- ・ マルチビームアンテナのビーム間干渉の低減・低サイドローブ化
- ・ 高周波送受信回路、高周波帯高効率 HPA

(4) 深宇宙通信、月・地球間通信

(1)~(3)は、地上をサービスエリアとする衛星通信システムの利用シナリオと課題であるが、人類の宇宙進出に伴い、深宇宙通信、月・地球間通信が必要となろう。最近、NASA は月への有人宇宙探査を長期目標として産業界連携および国際協力等により「月軌道プラットフォーム・ゲートウェイ (LOP-G)」の構築を本格化している。この場合、データ中継衛星を用いた通信となるが、「地上 GW 局ーデータ中継衛星ー宇宙探査衛星・月面無線局」の利用シナリオが想定され、高速・大容量化に向けて「データ中継衛星ー宇宙探査衛星・月面無線局」間では空間光通信が有望と考えられる。日本では、常時のアクセス性やオリジナリティを考え、静止軌道上に深宇宙のデータ中継局を設置するなどの方策も検討する必要がある。また、深宇宙通信に適する高感度な通信方式の研究開発が必要であり、高感度なパルス位置変調 (PPM) 方式を用いた光通信技術や、高感度な単一光子検出器等の研究開発も検討する必要がある。

5.2.2 将来必要となる技術

5.2.1 の将来の静止衛星、低軌道衛星、HAPS を用いる 3 種類の衛星通信システムにおいては、主に高速・大容量化に向けて、システム設計・ネットワーク制御技術、サービスリンク大容量化技術、フィーダリンク大容量化技術、高周波帯通信・高周波回路技術等で概ね共通の技術課題があり、それぞれに要求条件は異なるが、以下の技術項目に整理できる。

②-1 通信容量増大化技術

(1) サービスリンク大容量化技術

(ア) 超マルチビームアンテナ技術

静止衛星では我が国をサービスエリアとする場合は 100 ビーム以上、低軌道衛星では衛星当たり数十～100 ビーム、HAPS では 100～400 ビーム程度の超マルチビーム化が期待される。超マルチビームアンテナの実装にはフェーズドアレー、開口アンテナ等、種々の方法があり、静止衛星、低軌道衛星、HAPS システムの構成と使用周波数帯により要求条件、実現方法や技術課題が異なる。低軌道衛星や HAPS では所要衛星数・HAPS 数低減のため照射範囲の広域化が求められる。

(イ) 衛星 Massive MIMO 技術

衛星通信では、災害時に特定ビームにトラヒックが集中するなど、トラヒック需要に応じた柔軟なビーム形成と共に、衛星リソースである帯域と送信電力を、所望のエリアに柔軟に割り当てる必要がある。ビーム形成と送信電力割り当てにはデジタルビームフォーミング技術、帯域割り当てにはデジタルチャネライザ技術が必要になる。さらに、周波数再利用による大容量化のため、同一周波数を用いるビーム間干渉・ユーザ間干渉を低減する動的ビームフォーミング技術が必要となる。これは、地上セルラネットワークの Massive MIMO 技術に相当し、ここでは衛星 Massive MIMO 技術と称する。

(ウ) 動的リソース制御技術

衛星 Massive MIMO では、衛星リソースである帯域と送信電力を動的に割り当てる動的リソース制御技術が必要になる。低軌道衛星、HAPS システムでは伝搬遅延が小さく、5G システムと同等のリソース制御を実現できる可能性があるが、静止衛星システムでは大きな RTT のためリソース制御に制約が生じる。

(2) フィーダリンク大容量化技術

(ア) マルチビームフィーダリンク技術

単一 GW 局では大容量化に伴いフィーダリンクに膨大な帯域が必要となる。この問題を解決するには、直交偏波利用、マルチビームアンテナを用いた周波数再利用が考えられる。複数の GW 局が必要になるが、大容量化に加えてサイトダイバーシティ・二重化による高信頼化が期待できる。静止衛星、低軌道衛星、HAPS のシステム構成、使用周波数帯により技術課題が異なる。

(イ) 減衰対策・高信頼化技術

衛星通信システムは、GW 局を通じて地上ネットワークに接続されるため、フィーダリン

クでの降雨、雲、霧、大気減衰に対するダイバーシティ等の減衰対策と高信頼化が重要になる。

②-2 高周波帯通信技術

高速・大容量化には高周波数帯の利用が求められる。静止衛星システムでは、従来の Ku バンド、K バンド、Ka バンドに加えて、Q バンド、V バンド、W バンドの利用が期待される。また、非静止衛星、HAPS を用いる通信システムでも、V バンド、W バンドの利用、さらに広い帯域が利用できる空間光通信が期待される。高周波帯通信の実現には、高周波回路技術、ならびに高周波数帯で問題となる降雨、雲、霧、大気による伝搬減衰に対する減衰対策技術が必要になる。

(ア) 高周波回路技術

衛星通信システムでは、HAPS システムでも 20~100km の長距離通信となるため、端末、GW 局で大きな送信電力が必要となる。近年では、Ku 帯で 100W までの高出力 GaN HEMT・MMIC が実現されており、K バンド、Ka バンド、さらには Q バンド、V バンドに向けた大電力増幅器の開発が求められる。一方、周波数変換器、シンセサイザ等については、Ka バンド、Q バンド、V バンドの RF-CMOS MIC の開発等が必要と考えられる。

(イ) 減衰対策技術

衛星通信システムは GW 局を介して地上ネットワークに接続され、K バンド、Ka バンド、Q バンド、V バンドの高周波数帯をフィードリンクに用いる場合、降雨、雲、霧、大気減衰に対するサイトダイバーシティ等の減衰対策と高信頼化が重要になる。

(ウ) 高精度指向方向制御技術

低軌道衛星、HAPS システムでは、移動する衛星、飛翔体に対してアンテナ追尾が必要となる。低軌道衛星間通信や HAPS 間通信、静止衛星—低軌道衛星・HAPS 間通信では、一方または双方が移動するため、衛星搭載の高精度指向方向制御技術が必要となる。

②-3 空間光通信技術

光は電波に比べ周波数が 4 桁高く、THz 級の帯域が利用可能でシステムの大容量化を実現できる。衛星間は降雨や大気のない自由空間伝搬であるため、空間光通信の利用が有望と考えられ、HAPS 間通信でも利用できる可能性がある。静止衛星／非静止衛星／HAPS と地上 GW 間のフィードリンク利用においては、降雨、雲、大気ゆらぎ等への減衰対策は、電波との組み合わせにより実現できる可能性がある。地上光通信技術をベースとした技術開発となる。

(ア) 光・電波変換技術

フィードリンクで電波、衛星間で空間光通信が利用される場合は、衛星上での光・電波変換を行い、衛星間で空間光通信を行う。このための衛星搭載可能な光・電波変換技術が必要になる。

(イ) 光アンテナの高精度指向方向制御技術

光の周波数は電波より 4 桁高く、小型で高アンテナ利得の光アンテナを実現できる。光

アンテナは光学望遠鏡であり、光アンテナ径を 10cm、使用波長を 1.55 μ m とすると、半値幅は 10 μ rad となるため、1 μ rad (約 0.00006deg) 程度の精度の指向方向制御が必要になる。この指向方向を捕捉し維持する高精度指向方向制御技術が必要なる。非静止衛星間の光通信では、双方が移動するため、クローズドループ制御による超高精度指向方向制御技術が必要と考えられる。

(ウ) デジタルコヒーレント空間光通信技術

光伝搬路が真空の場合は、基本的に等化は不要であるが、衛星・地上間通信では、大気の影響によりマルチパス伝搬となる可能性がある。

(エ) 衛星搭載用光通信デバイス

地上光通信用に開発されたレーザー、光アンテナ、波長多重用デバイス、光 IC 等のデバイスの衛星搭載化が必要になる。このデバイス技術の進展により、空間光通信においても、バックボーンネットワークに相応しい超大容量化に向けて、波長多重による超大容量空間光通信の実現可能性がでてくると考えられる。また、衛星では低消費電力化が極めて重要で、衛星間光通信では、光信号を直接切り替える低消費電力光スイッチング技術の確立が期待される。近年、グラフェンと光ナノ導波路で超高速・低消費電力の全光スイッチングが報告されており、本格的な超高速・低消費電力の光情報処理 IC 技術の確立が期待される。

②-4 衛星間連携技術

静止衛星システムでは基本的に通信衛星毎にシステムが構築されるが、低軌道衛星、HAPS システムでは、複数の衛星/HAPS が連携したシステムとなるため、衛星/HAPS 間連携技術が課題となる。

(ア) 低軌道衛星間連携技術

低軌道衛星を用いるメガコンスタレーションシステムでは、多数の低軌道衛星を用いるため、衛星高度、衛星数、衛星の所要機能、地上局数等のトレードオフなどの基本的なシステム設計技術の確立が必要となる。また、衛星間連携技術として、端末ービーム間・低軌道衛星間・地上 GW 局間の接続・制御を行うネットワーク制御・ルーティング技術、トラヒック需要に応じてビーム、帯域と送信電力を複数の低軌道衛星が連携して割り当てるリソース制御技術、故障時の低軌道衛星交代などの衛星ネットワーク再構成技術などがあげられる。

(イ) HAPS 間連携技術

HAPS システムでは複数の HAPS を用いるため、HAPS 高度、HAPS 数、HAPS の所要機能、地上 GW 局配置などの基本的なシステム設計技術の確立が必要となる。また、HAPS 間連携技術として、端末ービーム間・HAPS 間・地上 GW 局間の接続・制御を行うネットワーク制御・ルーティング技術、トラヒック需要に応じたビーム、帯域と送信電力を複数の HAPS が連携して割り当てるリソース制御技術、故障時の HAPS 交代などのネットワーク再構成技術などがあげられる。HAPS 間通信では、空間光通信技術、HAPS 搭載スイッチ技術およびルーティング技術があげられる。

(ウ) 衛星・地上ネットワーク連携技術

衛星システムは地上システムと連携して動作する必要があり、衛星システムと地上システムとの統合ネットワーク制御技術、システムに応じた衛星間連携技術の開発が必要になる。モバイル通信の場合は、端末の移動管理や位置管理を、地上ネットワークと連携して制御する必要がある。これらは静止衛星、低軌道衛星、HAPS システムの各システムの構成、仕様に応じたものになる。

②-5 その他

(ア) 衛星量子暗号技術

将来の通信システムのセキュリティを守る究極の技術として重要である。中国により量子鍵配送の基礎的な実験が宇宙実証されているが、課題は鍵レートが遅いことである。実用的な衛星量子鍵配送を実現するには、高レートで伝送可能な単一光子光源の開発や、高速・高感度な単一光子検出器技術の開発、そして、実現していくための実用的な衛星量子通信方式やシステム開発などが必要である。

(イ) テラヘルツ技術

高速・大容量化のためには、さらなる高周波数帯の利用が必要であり、その選択肢の一つとして、テラヘルツ技術がある。衛星通信での実用化は Q バンド、V バンド、W バンドのあとであり、現在は基本技術の研究開発の段階である。

(ウ) ソフトウェア化衛星技術 (Software Defined Satellite)

ソフトウェアにより衛星機能を再構築し、機能向上を図ったり、通信方式を変更したりする技術である。静止衛星の場合、10 年～15 年の寿命があるので、寿命期間内のスペック変更にも柔軟に対応できる技術である。

5.2.3 将来必要となる技術の世界の動向と日本のプレゼンス

静止衛星システムに関しては、静止通信衛星のスループットを大幅に向上させた高速大容量の HTS が増加している。我が国では、地上ネットワークの整備が十分進んでいることもあり、HTS に対するニーズは少なく、この分野における日本のプレゼンスは必ずしも高くない。しかし、技術試験衛星 9 号 (ETS-9) の開発に併せて、HTS に必要となるデジタルチャネライザ、デジタルビームフォーミング技術の開発が進められている状況で、キャッチアップの段階といえる。

中・低軌道の多数の小型衛星による協調システムであるコンステレーションによる新たな衛星ブロードバンド通信システムが計画され、実験・商用化に向けた段階にきている。コンステレーションシステムの特徴は、①小型・超小型衛星の利用と、スケールメリットによる衛星製造コストの抜本的な低コスト化と、②多数の衛星を用いた全地球対応の通信ネットワーク構築にある。O3b Networks 社は高度約 8,062km の軌道に Ka バンドを用いた O3b 通信衛星を打ち上げ、OneWeb 社は高度 1,200km で 648 機の Ku バンド超小型通信衛星を用いたシステム構築を計画している。また、Space X 社では Starlink というコンスタ

レーションを計画しており、既に 180 機の衛星を打ち上げ、最終的な衛星数は 10000 機以上とされている。しかし、我が国が関与する低軌道衛星システムの計画はなく、HTS と同様、日本のプレゼンスは高くない。

一方、将来必要となる技術に関しては、地上システムで高い技術力を有している分野があり、これを衛星通信に展開していくことで、日本のプレゼンスの向上につなげられる可能性のある分野がある。例えば、通信容量増大化技術の衛星 Massive MIMO 技術に関しては、第 5 世代モバイル通信で Massive MIMO 技術の研究開発が進められており、これを衛星 Massive MIMO に応用することが可能と考えられる。また、空間光通信に関しては、静止衛星を用いた光通信ミッションに関しては、欧州の EDRS (光データ中継システムの衛星間光通信、1.8Gbps)、米国の LCRD (光データ中継システムの衛星間光通信・光ファイダリンク、1.24Gbps) と比肩する計画が、我が国の JDRS (光データ中継システムの衛星間光通信、1.8Gbps)、HICALI (光ファイダリンク、10Gbps) で計画されており、高いプレゼンスを有する。また、地上光通信システムにおいては、デジタルコヒーレント光通信技術において高い技術力を有しており、これらを衛星通信の空間光通信に応用することで、日本のプレゼンスの向上につなげられる可能性がある。

HAPS システムに関しては、日本では、1998 年から 2005 年まで、ミレニアム・プロジェクトのひとつとして研究開発が行われたが、我が国の地上通信網の整備の進展により、事業化の可能性が極めて低いと判断されプロジェクトは終了した。しかし、2019 年にはソフトバンクが HAPS の事業化を発表した。すでにエアロバイロメント社 (米・AeroVironment, Inc.) の協力により、地上約 20 キロメートルの成層圏で飛行させる HAPS 向け無人航空機「HAWK30」を開発しており、1 基で直径 200 キロメートルの広いエリアをサービス化する計画で、インターネット接続環境が乏しい赤道直下の国々等を対象に 2023 年ごろのサービス開始を目指している。

高周波帯通信技術については、高周波回路技術に関して、高出力 GaN HEMT・MMIC やミリ波帯 RF-CMOS MIC 設計などで世界に比肩する技術力を有する。しかしながら、無線チップ事業などのデバイス分野における我が国の競争力は必ずしも高くない状況にある。

5.2.4 国が取り組むべき技術項目

静止衛星、低軌道衛星、HAPS システムに関しては、我が国の地上通信ネットワークの整備が進んでいることもあり、国内での大きな需要はない。このため、国内での衛星通信関連のビジネス規模は相対的に小さく、衛星通信分野の技術者・研究者はすでに極めて少ない状況である。

宇宙関連ビジネスでは、我が国は、技術力はあるものの、コスト競争力が低く、ビジネス面でのプレゼンスが低い状況にあった。世界的にも、宇宙分野の研究開発、ビジネスは国家主導で進められてきていた。しかし、近年、ロケットを含む宇宙分野への民間参入が進みつつあり、ロケットや地上システムで利用されている部品を利用した通信衛星の開発など、低

コスト化により参入障壁が大幅に下がりつつある。また、多数の低軌道衛星を用いるメガコンスタレーションでは、グローバルサービスとしての IoT、インターネットサービスの視点から、全地球をサービスエリアとする衛星通信の役割が見直されつつある。

このような背景から、衛星通信分野については、国内ニーズのための研究開発ではなく、グローバルビジネスに向けての研究開発に大きく視点を転換する必要がある。ETS-9 は、電化バス技術、HTS に必要となるデジタルチャネライザ、デジタルビームフォーミング技術などの研究開発により、我が国での衛星通信利用のためのみではなく、通信衛星ビジネスのグローバル展開を目指した技術開発として適切と言える。前述のように、空間光通信では世界に比肩するプレゼンスがあり、衛星 Massive MIMO、空間光通信では、5G システムでの Massive MIMO 技術、地上光通信でのデジタルコヒーレント光通信技術を衛星通信用に展開することで、世界的な日本のプレゼンスの向上につなげられる可能性がある。このような将来の競争力確保が期待される技術項目に関して、ETS-9 プロジェクト、あるいは次期技術試験衛星プロジェクトを核として、大学、産業界が一体となって技術開発を進めることが望まれる。技術開発に関しては、地上システムにおける研究開発とのシナジー効果についての視点も重要である。民生品 (COTS: commercial off-the-shelf) の宇宙利用も進んでおり、衛星通信プロジェクトと他の地上システムの研究開発プロジェクトとの連携強化が望まれる。

5.2.5 技術ロードマップ

将来システムと詳細技術のロードマップを図 5.2.2 に示す。今後 10~20 年間に注力すべき項目を示した。通信容量増大化技術に関しては、超マルチビームアンテナの 100 ビーム級から 1000 ビーム級へと量的な拡大を、適用システム (静止衛星、低軌道衛星、HAPS) の要求仕様に併せて進めることになる。マルチビーム化の進展にあわせて、衛星 Massive MIMO 技術、動的リソース制御技術の開発を進めることになる。マルチビームフィーダリンクと減衰対策/高信頼化技術はセットでの技術開発となる。高周波帯通信技術は、Q バンド、V バンド、W バンドと順次、高周波化が図られることになるが、B5G の高速・大容量化のために研究開発が進められるため、地上システムの進展と併せて研究開発が進められるべきであろう。空間光通信技術に関しては、光・電気変換技術と光アンテナの高精度指向方向制御技術の実現により、ここ 10 年を目途に 10Gbps~100Gbps の空間光通信の実現を目指すことになると考えられる。これに必要な光通信デバイスについては、地上の光通信システムの高速・大容量化に向けて技術開発が進められているところであり、この研究開発とのシナジー効果が発揮できるよう留意が必要である。

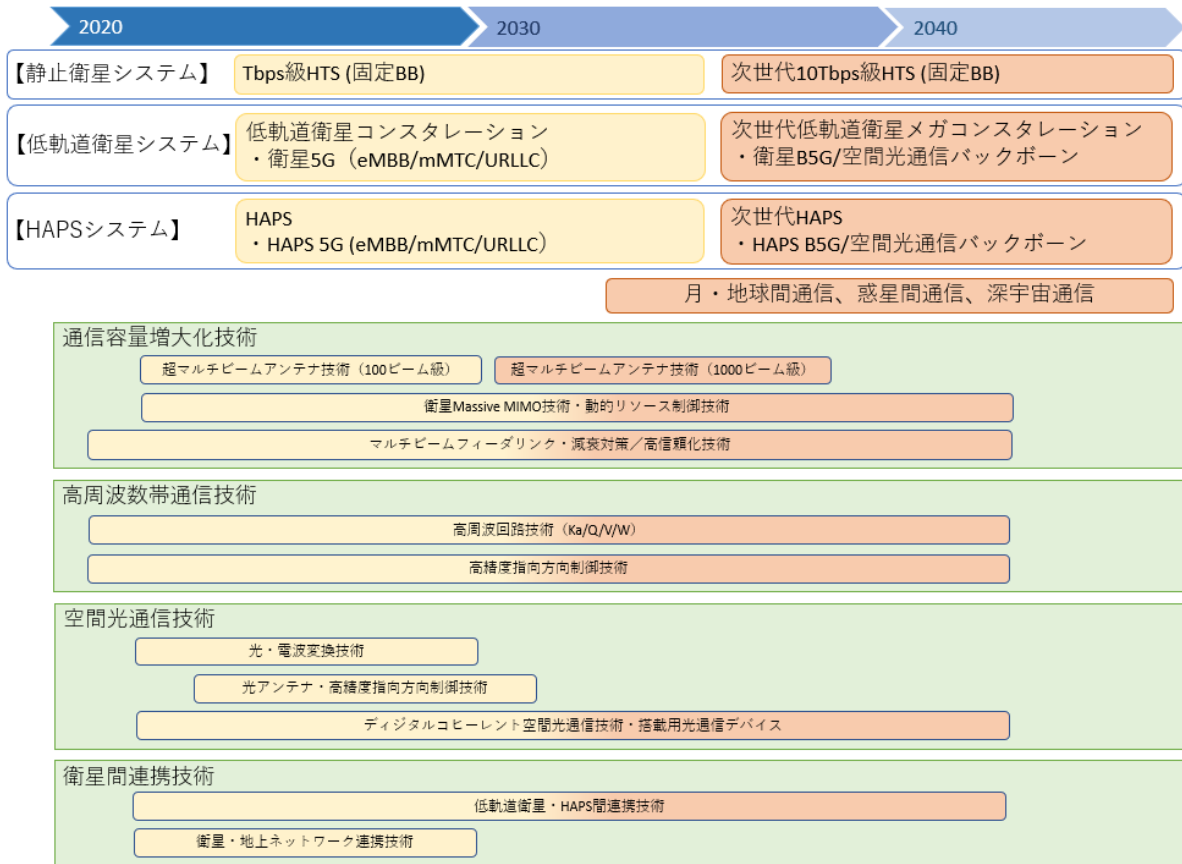


図 6.2.2 宇宙・衛星通信分野の技術ロードマップ

5.2.6 将来システムのイメージ図

将来システムのイメージ図を図 5.2.3 に示す。

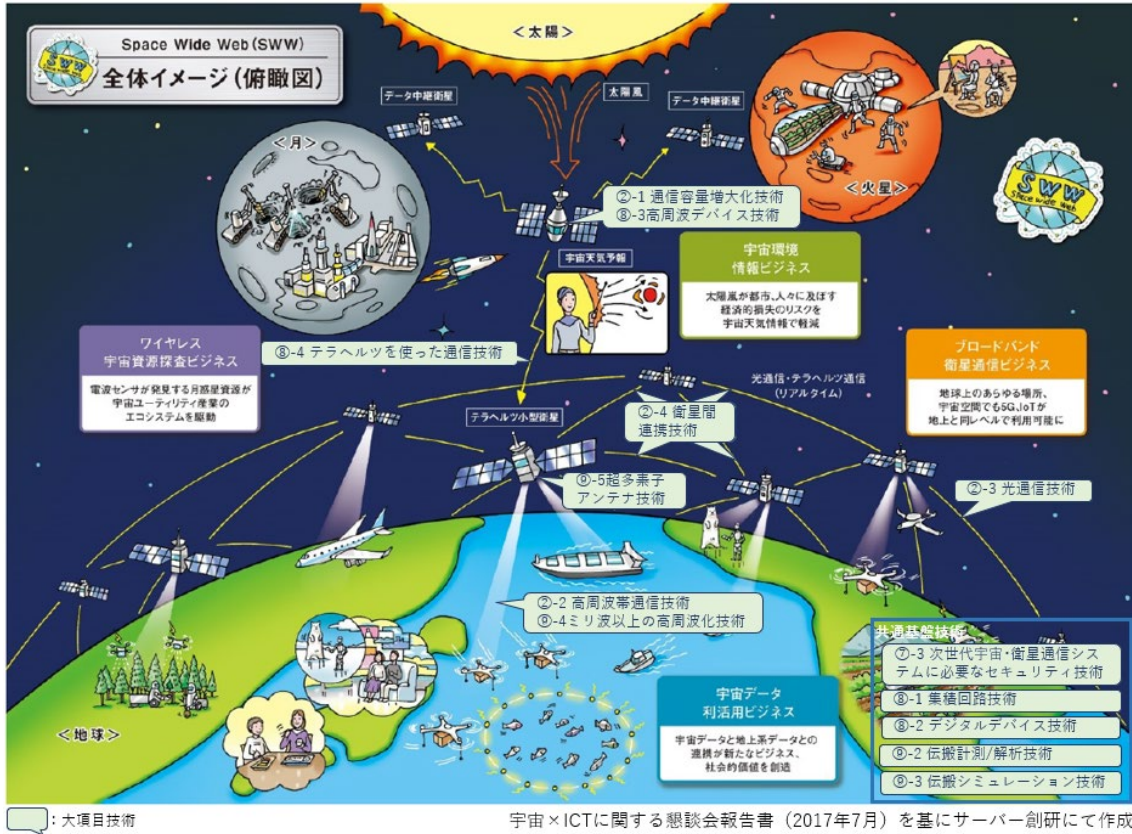


図 5.2.3 宇宙・衛星通信分野の将来システムイメージ図

5.3. センシング/IoT 分野

執筆 : 原 晋介 (大阪市立大学 大学院工学研究科 電子情報系専攻 教授)

執筆協力: 嶋本 薫 (早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 情報通信学科 教授)

執筆協力: 三次 仁 (慶應義塾大学 環境情報学部 政策・メディア研究科 教授)

5.3.1 将来動向

5.3.1.1 将来システムの展望

すべての社会システムは、広い意味での人間生活のさらなる快適化を目的として発展していく。センシング/IoT システムには、センスする実体とセンスされる実体があり、センス（を目的と）する実体は常に人間であるが、センスされる実体には人間を取り巻く社会システム側にあるのか、それとも人間自身にあるのかの 2 通りが存在する。

都市・インフラといった社会共通資本の領域では人間を取り巻く社会システム側のあらゆる構成要素に様々な種類のセンサーが埋め込まれ、それらセンサーが無線と有線によりネットワーク化されてセンシング/IoT システムが構築される。スマートシティに代表されるように、建物の内外、道路、橋梁や移動体等にセンサーが取り付けられ、そこでセンスされたデータは、物理空間の快適化、環境保全や老朽化防止・検出や事故防止のために利用される。社会システムの構成要素には現状では故意あるいは能動的にセンサーが取り付けられているが、将来は、材料そのものに最初から自然とセンサーが埋め込まれているようになる。従って、当然、センサーの個数は莫大となる。

農業・水産業・畜産業・工業の領域でのセンシング/IoT システムも社会システム側にセンサーが埋め込まれる。農耕地にセンサーが散布され、農作物の効率的な栽培・育成に利用され、海中あるいは魚をはじめとする生きた水産物にセンサーが取り付けられ、水産物の効率的な育成や海洋汚染のモニタリングに利用される。また、森林や山間部にセンサーが散布され、林産資源の効率的な育成、環境保全に利用される。さらには、工場やプラント内の機器や装置にセンサーが取り付けられ、生産性の向上、事故防止やメンテナンスのために利用される。

一方、医療・健康・看護・福祉・介護の領域では人間自身にセンサーが取り付けられ、センサーがネットワーク化されてセンシング/IoT システムが構築される。侵襲を伴うような、体組織、臓器や脳内に埋め込まれるセンサーはインプラントセンサーと呼ばれ、それらでセンスされたデータは治療に利用される。一方、体表面に取り付けられる非侵襲なセンサーはウェアラブルセンサーと呼ばれ、そこでセンスされたデータは医療、健康、看護、福祉や介護目的に利用されるが、ウェアラブルセンサーでセンスされる情報の一部は将来、非接触あるいは無拘束のセンサーに置き換わる。インプラントセンサーやウェアラブルセンサーで得られる生体情報はボディエリアネットワークで収集されるが、非接触や無拘束のセンサーは人間を取り巻く社会インフラ側に徐々に設置されるようになる。つまり、人間の生体情報もすべて社会システム側に取り付けられたセンサーにより取得されるようになるのが究極の姿である。

生体センサーの性能は非常に速いテンポで向上し、それにより医療のデジタル・トランスフォーメーションが加速する。我々は毎日の個人の生体情報を情報銀行に預けることにより利子を得るようになるが、それを可能にするのは生体センサーの性能向上と生体センシング/IoT システムの高信頼化である。

スポーツの領域では、社会システム側と人間自身にセンサーが取り付けられセンシング/IoT システムは発展する。現状でも設置されたカメラを用いる Hawk Eye、Tracab、Statcast 等のシステムがプロフェッショナルなテニス、サッカーや大リーグ野球の分野で、スポーツ選手や球のトラッキングに使用されているが、センサーの高機能化と共にシステムが安価で製造できるようになり、プロフェッショナルやアマチュアを問わずスポーツの分野でセンシング/IoT システムの活用が進む。スポーツの分野でのセンシング/IoT システムは、健康維持や健康増進、怪我予防が生体センシングの目的となるが、センサーにより人間の五感ではセンシングできない情報がセンシングできるようになるため、生体情報はエンターテインメント性の向上のために利用されるようになる。このことは、e-スポーツやゲームの分野での生体情報の利用によるエンターテインメント性の向上とリンクする。

5.3.1.2 将来システムのスペック

センシング/IoT システムのラスト・ワン・ホップは無線によって実現されるので、無線通信方式の役割が重要になる。

現状、センシングを目的とした無線通信システムとして、アンライセンスバンドのサブギガヘルツ帯の無線通信方式として Wi-SUN、SigFox、LoRa や IEEE 802.11h が、また、携帯電話のライセンスバンドの無線通信方式として NB-IoT が、さらには、5G システムでもライセンスバンドで IoT 機器向けの無線通信方式が用意されている。しかしながら、Wi-SUN を除く、これらほとんどの無線通信方式はシングルホップ伝送しかサポートしていないため、センサーネットワークの設計時にカバレッジが決定され、また、移動体にセンサーを取り付けることが困難となっている。将来的に、センシングカバレッジの設計後の拡大と移動体を収容するために、マルチホップ伝送をサポートする無線通信方式が必要となる（ネットワークトポロジーのヘテロジニシティ）。また、センシング/IoT システムはシングルホップとマルチホップが混在した状態で運用され、1 システムのカバレッジも屋内の一部から一都市全体まで幅広くなるので、低消費電力でも数 cm から数十 km の伝送距離を持つ無線通信方式が必要となる（伝送距離のヘテロジニシティ）。上で述べた現状のあるいは近い将来の無線通信方式は、データ伝送速度として、数百 bps から数十 kbps までの低速伝送速度しかサポートしない。将来、様々な用途で動画像情報を必要とするアプリケーションが増えると考えられるので、数百 bps から数 Mbps までのスケーラブルなデータ伝送速度をサポートする無線通信方式が必要となる（データ伝送速度のヘテロジニシティ）。

社会インフラの材料に最初からセンサーが埋め込まれている状況を考えると、様々な種

類の（センサーの種類へのヘテロジニュイティ）膨大な数のセンサーを1つのネットワークがハンドリングする必要が生じる（超大量接続性）。センサーには、種類のほかに、センサーに搭載されているCPUには能力の高いものや低いもの、その時の処理能力には余裕があるものやないもの（処理能力へのヘテロジニュイティ）、センサーのエネルギー源には、バッテリーレス、エネルギーハーベスティングで動作するもの、交換可能なバッテリーを搭載しているもの、電力ケーブルでエネルギーが常に供給されているもの等があり（エネルギー源へのヘテロジニュイティ）、センサーの稼働時間には連続動作で数時間から間欠動作で数年（稼働形態へのヘテロジニュイティ）のもの等が登場する。一方、センサーで取得されるデータには、遅延を許容できるものとできないもの（伝送許容遅延へのヘテロジニュイティ）、高信頼な伝送を必要とするものやしないもの（伝送信頼性のヘテロジニュイティ）、高度なセキュリティを要求するものやしないもの（セキュリティへのヘテロジニュイティ）等がある。

従って、将来のセンシング/IoTシステムは、上で述べた性質や特徴を持ったセンサーから、そこでセンサされた情報を効率良く収容・解析・フィードバック（アクション）できなければならない。

5.3.1.3 将来システムの課題

上で述べた、種類のヘテロジニュイティ、処理能力へのヘテロジニュイティ、エネルギー源へのヘテロジニュイティ、稼働形態へのヘテロジニュイティを持ったセンサーを「ヘテロジニアスなセンサー」、伝送許容遅延へのヘテロジニュイティ、伝送信頼性のヘテロジニュイティ、セキュリティへのヘテロジニュイティを持ったデータを「ヘテロジニアスなデータ」、さらに、ネットワークポロジーへのヘテロジニュイティ、伝送距離へのヘテロジニュイティ、データ伝送速度へのヘテロジニュイティ、超大量接続性を持ったネットワークを「ヘテロジニアスなネットワーク」とそれぞれ定義すると、将来システムの課題は、膨大な「ヘテロジニアスなセンサー」でセンサされる「ヘテロジニアスなデータ」を効率良く収集・解析・フィードバック（アクション）できる「ヘテロジニアスなネットワーク」を構築することである。

5.3.2 将来必要となる技術

5.3.2.1 課題解決に必要な技術項目

③-1 超大量接続技術

センサー自身とセンサーで取得されたデータがヘテロジニアスな性質を持っている超大量のセンサーノードをネットワークに収容するための技術であり、センサー・プロファイリング、アクセス制御技術、ネットワークング技術、ノード管理技術やノード配置技術を含む。

③-2 エネルギー供給技術

センサーノード内あるいはセンサーノード外からエネルギーを供給する技術であり、バッテリーレスで動作するセンサーノードに対しては、無線エネルギー伝送技術、エナジーハーベスティング技術、一方、バッテリーあるいはバッテリーレスで動作するセンサーノードに対しては、高効率小型電池技術、センサーの省電力化技術、省電力アクセス制御技術、ネットワークング技術やボックスキャッタ技術を含む。

③-3 センサー連動技術

超大量の同種のセンサーあるいは異種のセンサーノードを連携させて動作させる技術であり、GPS等を利用しないノード間時刻同期技術やノード位置取得技術を含む。

③-4 ネットワーク・クラウド連携技術

データの収集、蓄積、解析とフィードバックを行う技術であり、エッジコンピューティング、クラウドコンピューティング、また、フォグコンピューティングにおけるエッジコンピューティングとクラウドコンピューティングの負荷配分を決定する技術を含む。

5.3.2.2 詳細技術の説明と目指すべき技術レベル

③-1 超大量接続技術

(ア) センサー・プロファイリング

アプリケーション層プロトコルである IEEE 11073 は医療・ヘルスケア機器の種類、データフォーマット等を規定しているため、IEEE 11073 に基づいた通信セッションを開始すると、相手の機器の種類が判明し、データフォーマットが理解できる。同じことが Bluetooth ではプロファイルとして定義されており、通信セッションの開始時に相手の機器の種類、データフォーマットや伝送速度が理解できる。

ヘテロジニアスなセンサーとヘテロジニアスなデータを1つのシステムで一括して収容するためには、このようなアプリケーション層プロトコルが一般的なセンサーにも必要になる。この場合、そのセンサーの種類、処理能力、エネルギー源、稼働形態等を宣言できるデータフィールドが必要となる。

これらの情報は、物理層(PHY)/メディアアクセス制御層(MAC)においてはシグナリング(そのセンサーが無線エネルギー伝送でシグナリングが開始されるかどうか)の決定、ネットワーク層(NWK)においてはルーティング(そのセンサーが中継ノードになりえるかどうか)、アプリケーション層においては必要とするセンサーの選択やデータ解析処理の負荷分散(そのセンサーをエッジコンピューターとして使えるかどうか)の決定に使うことができる。

業界をまとめて日本国内でまず標準規格化し、その後、IEEE等の国際デファクトスタンダード化する必要がある。

(イ) アクセス制御技術

Wi-SUN、SigFox、LoRa や IEEE 802.11h、NB-IoT や 5G システム等の既存の接続技

術でサポートできるセンシング/IoT システムは、それらを使って構築すればよい。今後必要となる技術は、これらで効率良く収容できない、膨大な数のヘテロジニアスなセンサーでセンスされるヘテロジニアスなデータを収容するための時間・周波数・空間分割多重アクセス法である。例えば、センサーが非同期にデータを送信できるという観点からは、符号分割多重アクセスのリバイバルも一つの考え方である。

センサー・プロファイリングにより、相手センサーの情報は理解できている。バッテリーレスなセンサーからのデータ収集セッションは、バッテリーが搭載された従来のセンサーに対するように無線信号によるシグナリングで開始するのではなく、基地局、コーディネータ、アクセスポイントあるいはシンクノード（あるいは無線エネルギー供給機能だけを持ったトランスポンダのようなもの）からのエネルギー供給で開始する必要があるため、それを可能とする PHY/メディ MAC プロトコルを確立する必要がある。

技術を研究開発しながら、例えば、IEEE 802 のワーキンググループ 11 か 15 で PHY/MAC プロトコルの標準化を目指す必要がある。

(ウ) ネットワーキング技術、ノード管理技術、ノード配置技術

センシング/IoT システムのネットワークアーキテクチャを考える必要がある。インターネットのアーキテクチャでネットワークを構築すれば、遅延耐性ネットワーク(Delay Tolerant Networking: DTN)等のインターネットの膨大なプロトコル資産が利用可能であり、これにより移動するセンサーノードが容易に収容でき、さらに、IPv6 を使うと超大量のセンサーノードを管理できるようになるが、逆に、1 パケット中のデータ長に対してヘッダが長くなりすぎて伝送効率が著しく低くなる。従って、6LoWPAN (IPv6 over Low - Power Wireless Personal Area Networks) のようなアーキテクチャを根本的に考え直す必要がある。

電池駆動のセンサーとバッテリーレスなセンサーを混在させながら、1つのセンシング/IoT システムをメッシュネットワークで構成する場合、中継センサー（あるいはノード）は電池駆動のセンサーとし、シンクノード付近には電池交換が容易なセンサーを配置することとしたい。センサー間の通信状況やホップ数を考慮した従来のリンクメトリックやルートメトリックに、新たにセンサー・プロファイリングで得られた情報を加えてメトリックを計算し、それを使ったルーティング法を考える必要がある。

クラウドには、システムで収容しているセンサーのプロファイルデータを蓄積し、可能ならばその位置情報と共に、その内容を常にアップデートする必要がある。この情報は、センサー（ノード）の選択や管理あるいは新たなノード配置に向けてのデータとして使用できる。

ノード管理やノード配置を容易にするようなネットワーキング技術は、例えば、IETF (Internet Engineering Task Force) での標準化を目指す必要がある。

③-2 エネルギー供給技術

(ア) 無線エネルギー伝送技術

1つの基地局あるいはトランスポンダから、「複数の」「選択したノードだけに」「一度に」エネルギーを「効率良く」供給する技術を確認する必要がある。例えば、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 事業「脱炭素社会実現のためのエネルギーシステム」の中の1つにワイヤレス電力伝送(Wireless Power Transmission: WPT)システムがあり、そこでは、研究開発に関する2018年から2022年までのロードマップが示されている。しかし、「特定のデバイスだけに選択的に電力を伝送する技術」という研究開発項目はどこにも見当たらない。共振型の無線電力伝送は、効率良く電力を無線端末に伝送できるが、現行の電波法では、無線信号を変調できないため、「すべての」無線端末に、近い端末には多く、逆に遠い端末には少なくしか電力を供給できない。

ブレークスルーが必要であり、電波法の改正も視野に入れる必要がある。この技術が確立できれば、世界に与えるインパクトは大きい。ただし、人体に与える影響を考慮に入れる必要がある。

(イ) エナジーハーベスティング技術

受信できる様々な無線信号のエネルギーを蓄える技術、自然光や人工光を用いた発電技術、振動を用いた発電技術や温度差を用いた発電技術は、工場内のセンサーのようなハイスループットを要求する応用には向かないが、環境センシングのような低頻度のセンサーデバイスには向いており、今後、センサーノード数の増大に伴い、この技術の確立は必要不可欠となる。これに加えて、発電により得られたエネルギーを蓄える、蓄電の研究も必要である。

(ウ) バックスキャッタ技術

他のシステムで送受信されている無線信号を、外部から変調して情報を重畳して伝送する技術は、無線信号の送信にかかるエネルギーは必要としないため、低消費電力化が可能である。従って、センサーに向く無線伝送技術である。

(エ) 高効率小型電池技術、センサーの省電力化技術

電池のエネルギー密度の向上と、ノーマリーオフのような省電力回路技術は、センサーノードだけに留まらず、すべての無線端末に有益な技術である。

(オ) 省電力アクセス制御技術やネットワーキング技術

IEEE 802.11ba で標準化が進行中であるが、情報伝送に必要となる送信電力よりも小さな電力で寝ている端末を起こすウェイクアップ無線技術は、センサーノードには必須の技術である。

③-3 センサー連動技術

(ア) センサーノードを連携させて動作させる技術

単機能の多種のセンサーの集合に、人間が「ほしい情報」を与えた時、個々のセンサーのプロファイルから、適当なセンサーを選択しデータを収集する技術である。「ほしい情報」がセンサーの種類に直結していない場合は、クラウド等でその意味を理解し、適当なセンサーを選択する必要がある。また、同種の複数のセンサーに対する場合は、個々の処理能力から適当なセンサーを判断して選択する必要がある。

この技術は、AI やビッグデータを用いた技術と密接に関連してくる。

(イ) GPS 等を利用しないノード間時刻同期技術

膨大な個数のセンサーがデータを取得する場合、各センサーがそのデータをいつ取得したかが重要になる。センサーではそのデータを過去に取得し保存していたことも考えられるので、ネットワーク時刻だけでセンサーデータを管理することはよくない。あくまでも、各センサーがそのデータを取得した時刻が重要である。屋外に散布されたセンサーに GPS が搭載されている場合は、GPS から取得される時刻が使えるが、電力消費が大きくなるので必ずしも搭載されているとは限らない。従って、センサー間で情報をやり取りしながら正確な時刻同期を確立する方法が必要となる。アプリケーションにより時刻同期の精度も異なってくる。

(ウ) ノード位置取得技術

ノード間時刻同期技術のところでも述べたのと同じように、センサーに GPS が搭載されている場合は、GPS から取得される位置情報が使えるが、電力消費が大きくなるので必ずしも搭載されているとは限らない。従って、GPS を必要としない位置取得技術が必要となる。センスにされたデータ値に加え、それがセンスされた時刻と位置の情報が重要になる、あるいは時刻と位置がわかってはじめて意味をなすデータ値もある。特に、センサーが移動する場合は、データ値に加え、それがセンスされた時刻と位置の情報は必要不可欠である。

③-4 ネットワーク・クラウド連携技術

(ア) エッジコンピューティング、クラウドコンピューティング、フォグコンピューティング

センサーデータの解析をセンサーやノード等のエッジで分散させて行うのがエッジコンピューティング、一方、クラウド側ですべて収集して行うのがクラウドコンピューティングである。さらに、エッジとクラウドに処理を配分させて行うのがフォグコンピューティングである。センサー数が膨大になることは、収集されるデータ量も膨大となることを意

味するので、データ解析の負荷分散をネットワークの中で考える必要が出てくる。

同種あるいは異種の多数のセンサーの中からいくつかを選択して、データを収集する必要がある場合のセンサー管理最適化技術もエッジ、クラウドあるいは両方でやるのかを考える必要がある。

この技術は、AI やビッグデータを用いた技術と密接に関連してくる。

5.3.2.3 新しい技術観点からの将来技術

(1) AI・ビッグデータを用いたネットワーク制御

クラウドで収集されたセンサーデータとセンサーのプロファイルデータの時系列等のビッグデータを機械学習(AI)によって解析すれば、センサーやノードの処理能力の変動、センサーやノードのエネルギー源、リンクやルートの状態が理解できるようになるため、その解析結果を基にしてネットワークの制御が可能になる。この場合、Open Flow/SDN: Software Defined Network のようなネットワークアーキテクチャが必要になるかもしれない。また、その解析結果を基にすれば、5.3.2.2 ③で述べたセンサーの連携が可能になる。さらに、その解析結果を基にして、エッジコンピューティングでは、複数のエッジでの解析処理の最適な負荷分散が決定でき、フォグコンピューティングでは、複数のエッジとクラウドでの解析処理の最適な負荷分散が決定できるようになる。

(2) ブロックチェーンを用いたクラウドレスネットワークアーキテクチャ

クラウドはメンテナンスに莫大な費用がかかる。また、医療情報システムにおける個人情報に紐づけられた医療情報はセキュリティ上持ちたくない機関も多い。従って、医療情報システムでは、パーミッション型ブロックチェーン技術に基づいたクラウドレスネットワークアーキテクチャが検討されている。

ある程度高い CPU パワーや大きなメモリ容量が搭載されているセンサーやノードによってネットワークが構成されている場合は、クラウドを必要としないアーキテクチャも一つの選択肢となる。

5.3.3 将来必要となる技術の世界の動向と日本のプレゼンス

5.3.3.1 世界と日本の技術レベル差

情報通信システムの学術分野では世界と日本の差はない。例えば、IEEE のトップカンファレンスである ICC や GLOBECOM では日本の大学の研究発表は少なくなったがまだあるのが現状である。ただし、中国からの研究発表は非常に多い。情報通信システムの学術研究の重心は完全に中国に移っている。

情報通信システムの産業分野では、PHY/MAC 技術に関する発想と研究開発の観点からは、世界と日本との間に差はない。例えば、製品は市場にすでに出てきたが、標準化が現在進行中の IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) を最初に提案したのは NTT 未来ねっと研究所の研

究者であった（米国に途中からうまく主導権をとられた）。また、IEEE 802.11baとして標準化が現在進行中のウェイクアップ無線のアーキテクチャは「総務省地球温暖化対策 ICT イノベーション推進事業（*PREDICT*）（2010年度-2012年度）の研究開発成果に基づいている（かつてにうまく利用されている）。

ただし、製品化となると日本は完全に負けている。無線トランシーバのチップを製造することは今更日本ではビジネスとしては成り立たない。これからは、無線通信方式もオープン・イノベーションで考えるべきである。

5.3.3.2 日本の強み

(1) 豊富な人材

日本における情報通信関連の人は豊富である。会員数が減少しているとはいえ、電子情報通信学会には約2万5千人、通信ソサエティに限ると約9千人の会員がいる。

(2) 材料、デバイス技術

iPhoneの部品のうちで日本製が占める割合は減ってきていると言えサプライヤー数では、55社/269社、サムスンと華為のスマートフォンでもキーデバイスは日本製である。このように、材料やデバイス技術では日本が世界より抜きん出ている。従って、この技術は、センサーデバイスに大いに活用できる。

(3) 他国にないケーススタディの実行可能性

我が国の他国と異なる大きな特徴は、世界の国土面積全体のわずか0.25%しか占めていないにもかかわらず、災害被害額の世界全体に占める割合が18.3%であることからわかるとおり、その位置、地形、地質や気象等の自然的条件から、台風、豪雨、豪雪、洪水、土砂災害、地震、津波や火山噴火等による災害が発生しやすい国土となっていることである。従って、防災や減災を目的としたセンシング/IoTシステムを研究開発し社会実装することは、今後、我が国求められることのひとつである。他国に比較して災害が多いということは、社会実装した場合に、災害に対する耐力を評価できるケーススタディがそれだけ多くできるということを意味するので、日本の大きな強みの一つになりうる。

また、少子高齢化も日本社会の大きな特徴である。センシング/IoTシステムを活用して、高齢者に優しく、子供の健やかな成長を促すスマートシティを社会実装すれば、これもケーススタディがそれだけ多くできることを意味する。

5.3.4 国が取り組むべき技術課題

5.3.4.1 パワー・アウェアからエネルギー・アウェアへの転換した標準化政策

無線通信システムはこれまでセルラー電話から出発した移動体通信システムや無線ローカルエリアネットワークを中心にして進化してきたというのは過言でない。そこでの前提

は、端末は電力ケーブルで接続されており、どちらかと言うとエネルギーは無限にあるという前提で無線通信方式は研究開発されてきた。従って、電力一定の下で周波数帯域幅当たりどれだけ多くの情報が伝送できるのかを表す指標である bps/Hz の向上が主目的であった。

将来のセンシング/IoT システムのセンサーやノードでは電力ケーブルが接続されていることはまれで、小容量のバッテリー駆動かバッテリーレスで動作する 경우가ほとんどである。従って、供給される電力一定よりも利用可能なエネルギー一定という条件の下でどれだけ多くの情報を送れるかに注目する必要がある。例えば、移動体通信システムでは直交周波数多重(Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM)の周波数利用効率が高いため、多くのシステムで採用されてきている。しかし、OFDM の電力の利用効率は極めて低く 10%に届かないのが普通である。言い換えると、供給されるエネルギーの 90% は、機器を温めるために消費されている。一方、周波数シフトキーイング(Frequency Shift Keying: FSK)は成熟した変調技術であるが、周波数利用効率の低さから高速データ伝送が要求されるシステムではほとんど採用されていない。しかし、FSK の電力利用効率は高くほぼ 100%である。例えば、ここに 10Mbps をサポートする OFDM と、同じ帯域幅で 1Mbps しかサポートできない FSK があったとする。周波数利用効率は、明らかに OFDM の方が高いが、エネルギー有限の下でどれだけの情報を伝送できるかと考えると、FSK と OFDM はほぼ同じか、FSK の方がより多くの情報を伝送できる。FSK の方が変復調が簡単で、安価なトランシーバチップも多種数多く手に入る。

このように、センシング/IoT システムでは、エネルギーを意識した（エネルギー・aware）新しい標準規格を考えるべきである。

5.3.4.2 オープン・イノベーションの視点からの実装の容易性を考えた標準化政策

一つの悪い例が公共ブロードバンドにある。周波数の利用効率を上げるために公共ブロードバンドの PHY は OFDM を採用している。WiMAX の PHY が流用できるとの考えからであるが、周波数帯や送信電力が異なるため、実際には流用が非常に難しい。特に、OFDM では送信信号が定包絡とならないため送信アンプの設計が難しい。現在 1 セット約 1 億円することから、購入できる自治体が現れていない。周波数利用効率だけに着目するのではなく、セットアップして製品として世に出すときのコストも考えて標準規格は策定すべきである。日本のメーカーにトランシーバチップをスクラッチから製造する体力はない。安価なトランシーバチップが手に入り、それを活用できるような標準規格が必要である。

5.3.4.3 国が業界や学会と一緒にあって取り組むべき標準化政策

上で説明した、ヘテロジニアスなセンサーを収容するためにセンサー・プロファイリングを標準化するには、国、業界や学会の協力が必要である。PHY/MAC/NWK の設計はオ

オープン・イノベーションの視点に立ち、本当に必要とするものを安価に提供できることを考えて標準化するべきである。

日本の産業にとってプラスとなるような標準化であれば、国が積極的に関与し、最後までフォローアップすることが必要である。上で述べた IEEE 802.11ba 標準規格は日本にとって情けない例である。

5.3.4.4 電波政策

無線電力伝送用の周波数帯で大電力を送電するためには、無線信号に変調を施せない。変調を施してしまうと電波法の制限により微弱な無線信号しか伝送できなくなる。しかし、無変調の信号だと誰でも受電できてしまい、選択した受電局だけに電力を送電できることが原理的に難しい。例えば、ある程度低速ならば搬送波周波数をホップさせても大電力が送れるようになれば、そのホッピングパターンを知っている受電局だけに電力を供給できる。

「複数の」「選択した受電局だけに」「同時に」電力を送電する技術を確立するにはブレークスルーが必要である。電波法を少し変更するというだけでブレークスルーは生まれる可能性がある。

参考文献

- [1] Hawk Eye、 <https://www.hawkeyeinnovations.com/>
- [2] Tracab、 <https://chyronhego.com/products/sports-tracking/tracab-optical-tracking/>
- [3] Statcast、 <http://m.mlb.com/statcast/leaderboard>
- [4] ウェイクアップ無線、 総務省地球温暖化対策 ICT イノベーション推進事業 (PREDICT)「無駄な消費電力量を削減する Radio on Demand Networks の研究開発」(2010 年度-2012 年度)
- [5] ワイヤレス無線伝送、 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 事業「脱炭素社会実現のためのエネルギーシステム」(2018 年度-2022 年度)
- [6] ブロックチェーン、 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 事業「AI(人工知能)ホスピタルによる高度診断・治療システム」(2018 年度-2022 年度)

5.3.5 技術ロードマップ

将来システムと詳細技術の技術ロードマップを図 5.3.1 に表示する。

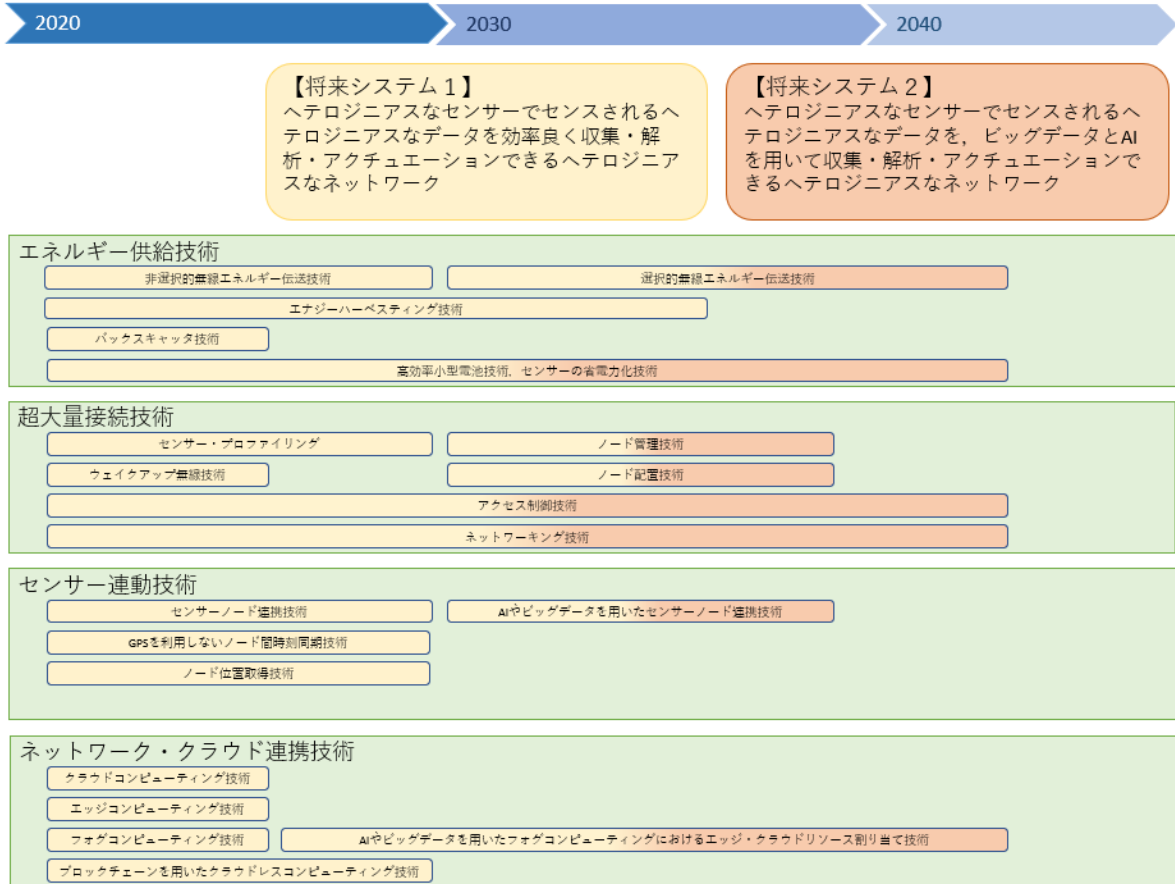


図 5.3.1 センシング/IoT 分野の技術ロードマップ

5.3.6 将来システムのイメージ図

将来システムのイメージ図を図 5.3.2 に示す。

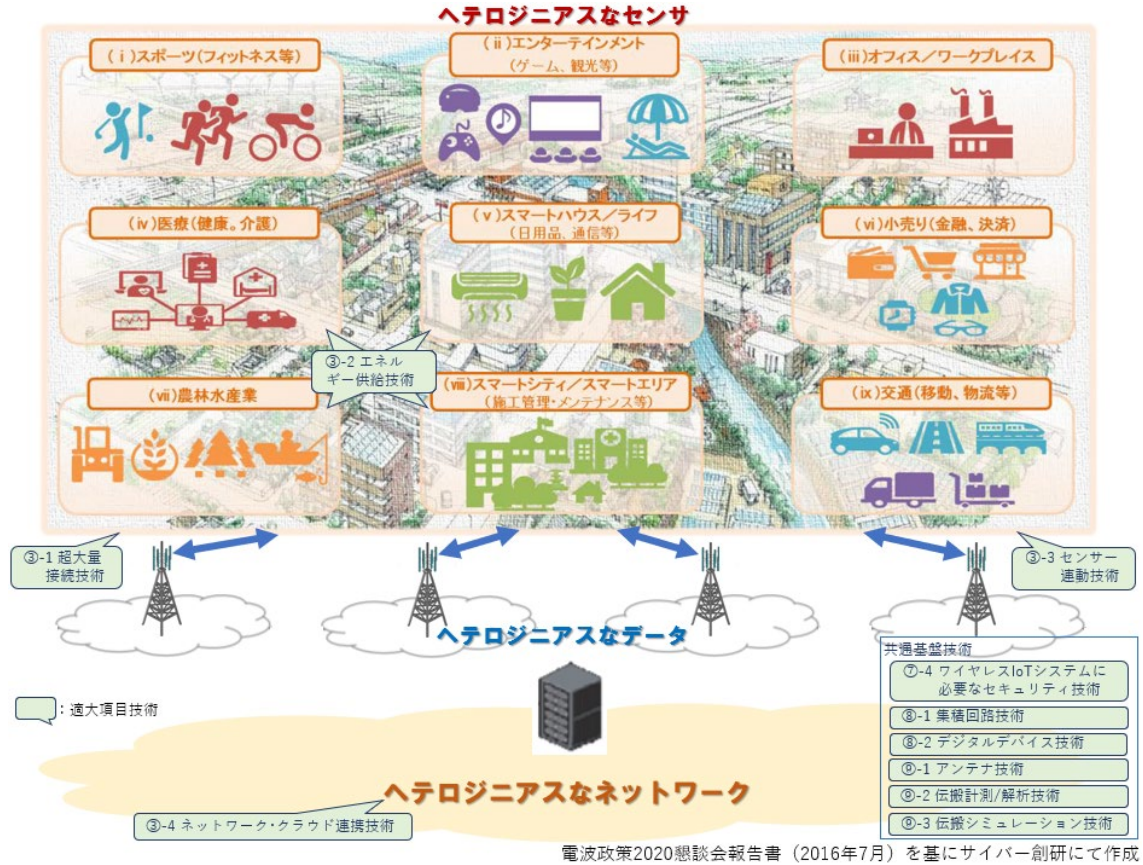


図 5.3.2 センシング/IoT 分野の将来システムのイメージ図

5.4 電力伝送分野

執筆：篠原 真毅（京都大学 生存圏研究所 教授）

執筆協力：庄木 裕樹（東芝 研究開発本部 研究開発センター 上級エキスパート）

執筆協力：高橋 応明（千葉大学 フロンティア医工学センター 准教授）

5.4.1 将来動向

ワイヤレス給電とは電磁界もしくは電磁波を介して無線で電力を伝送する技術の総称である。ワイヤレス給電は大きく分けると以下の2つの技術である。

- a) 高周波(数十 kHz-数十 MHz 程度)の磁界もしくは電界を介して短距離で無線電力伝送を行う結合型ワイヤレス給電。結合型とは、送受電器の位置関係が変わると、相互の回路パラメータ(共振周波数やインピーダンス等)が関連して変化するためにそう呼ばれる。高周波磁界を用いるものは送受電器としてコイルを主に用い、電磁誘導型と呼ばれ、高周波電界を用いるものは送受電器として平板導体を主に用い、静電誘導型と呼ばれる。これらの結合型ワイヤレス給電に、共振現象を加味して送電距離を少し伸ばすものが共鳴送電と呼ばれる。
- b) 電磁波(数百 MHz-数百 GHz)を介して長距離まで無線電力伝送を可能とする空間伝送型ワイヤレス給電。非結合型や、放射型とも呼ばれ、送受電器としてアンテナを用いる。送受電器の位置関係と回路パラメータに相互関係/影響は基本的にない。レーザー光を用いたワイヤレス給電(レーザー送電)も広義の意味で空間伝送型に入るが、法的に電磁波の定義は3,000GHz以下となっており、また電磁波/光の発生や受電整流の原理が異なるため、本報告ではレーザー送電は深くは取り扱わない。

両ワイヤレス給電とも高周波電磁界/波現象を介した無線電力伝送であるため、電気⇄高周波電磁界/波の変換回路が必要であり、電気→ワイヤレス給電→電気の伝送総合効率是有線のそれよりも一般的に低い。しかし、無線で電力を送れる利点を生かし、現在は稼働時間に制限のある2次電池に頼るモバイルや移動体へのワイヤレス給電の応用は効率の低さを補ってなお利点があるとされる。本章では結合型ワイヤレス給電と空間伝送型ワイヤレス給電に分けて、現状や将来を報告する。

5.4.1.1 将来システムの展望

a) 結合型ワイヤレス給電

現在すでに電動歯ブラシやシェーバー等のワイヤレス充電は製品ごとの独自方式で実用化が進み、身の回りに製品があふれている。Suica等に代表されるIC Card(NFC: Near field Communication と呼ばれる)も結合型ワイヤレス給電を採用しており、IC Cardは電池レスデバイスとして普及している。近年は世界中での統一規格(を目指した)スマートフォンのワイヤレス充電器や、電気自動車や電動バス等のワイヤレス充電も法制化の議論と実用化が並行して進んでいる。これらはすべて結合型ワイヤレス給電が高効率で動作可能な短距離(ほぼ0距離)で利用され、充電/給電中は送受電の位置関係が固定されている。固定短距離での結合型ワイヤレス給電であれば効率70-90%は

すでに実用化されている。単純な有線送電に比べると効率は低い、2次電池の充電は有線であっても結局交流→直流変換回路が必ず必要であるため、この変換効率を加味すると効率に大差はない。そしてワイヤレス給電のたとえ0距離であっても「接点が不要である」という利点はスマートフォンのデザイン等では有利とされ、充電の際にいちいち線をつなぐことなく自動的に充電を開始することができる利点は電気自動車や電動バス等の充電では有利とされ、実用化されている。

このような結合型ワイヤレス給電はその利点を最大限に生かすために将来はより「無意識な充電」と「移動中充電」へと向かうことが期待される。今後半導体技術の進歩等により、より高効率化が期待されるワイヤレス給電は、極論を言えばそれでも有線送電に効率ではかなわない。しかし、無線で電力が送られる利点は「有線の場合は線をつなぐという意識的な動作が必ず必要になる」問題と、「有線の場合は移動するものへの充電に距離的な限界がある」問題を解決することができる。「無意識な充電」は、結合型ワイヤレス給電の場合、その標準化と送電器の普及台数が鍵となる。コンセントのような物理的な規格の違いはワイヤレス給電にはなく、規格は高周波の周波数や電力量、送受電の(無線通信による)情報共有方法等である。これらは仮に規格が異なっても、結合型ワイヤレス給電という概念が合っていれば、ソフトウェアや回路のチューニング等で解決することも理論的には可能である。統一規格の送電器がいたるところ、例えばカフェやラウンジ、列車の席等いたるところに設置されていれば、置くだけでスマートフォン等が勝手に充電されるため、その利便性は高い。また「移動中充電」ワイヤレス給電の利点を最大限に生かすシステムであるが、結合型ワイヤレス給電の場合は送受電間の距離を伸ばすことが難しいため、高速道路に沿って設置された多数の送電器の上を走行する電気自動車等の応用等、ある程度限られたシステムが期待される。しかし、ワイヤレス給電は移動中でも停止中でも全く同じ送受電システムを利用できるため、停止中/移動中のシームレスなワイヤレス給電が可能となり、その期待は高い。そして無意識な充電であるために、自動運転技術等との相性が非常に良い。

また新しいシステムへの応用も期待される。例としてドローンの駐機中充電、インプラントデバイスへのワイヤレス充電、水中機器へのワイヤレス充電、等が考えられる。

b) 空間伝送型ワイヤレス給電

現在米国では産業用途で低消費電力のデバイス(マウスや電卓等)へのマイクロ波送電システムや、液晶表示タグへのマイクロ波送電、車の位置センサーデバイスへのマイクロ波送電など一部の製品についての認可が米国連邦通信委員会(FCC : Federal Communications Commission)からおり、実用化の兆しが見える。日本では現在総務省が空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの実用化のための議論を開始し、情報通信審議会に諮問され、作業班にて既存通信等との共存検討について議論を行っている。議論のベースとなっているのは工場などでの点検・管理・制御等のためのセンサーデバイスや、介護施設等でのバイタルセンサーへのマイクロ送電等であり、産業応用かつ室内

応用を前提とした議論が行われている。空間伝送型ワイヤレス給電の学術研究や、ベンチャー企業による研究開発は世界中で盛んに行われており、センサー等への弱い電力のワイヤレス給電のみならず、室内のすべての場所の携帯電話のワイヤレス充電や、飛行中のドローンへの大電力のマイクロ波送電や、宇宙太陽光発電への応用研究等が行われている。結合型に比べると、非常に長距離のワイヤレス給電を可能とする空間伝送型ワイヤレス給電であるが、その代りにアンテナサイズに依存して送受電間の伝送効率が非常に低く(ビジネス的なシステムを想定すると 10%以下)、GHz 程度以上の電磁波を利用することで送受電間のワイヤレス給電可能な距離を伸ばしているために、その電気⇄電磁波(GHz 程度)の変換回路の効率が結合型(数十 MHz 以下)のそれよりもさらに低い。しかし、効率が低くとも長距離(実用的には 10m 以上、理論的には数 km 以上無限)を無線で電力を伝送できることはモバイル機器等移動する電気利用者には最も魅力的であり、IC 等の低消費電力機器であれば、電池すら不要で無限に稼働可能な機器を作ることができる点も、空間伝送型ワイヤレス給電が期待されている点である。

将来的には前述の「電池不要で動作する電気機器(IC 等)」と「無意識な充電」がまず期待される。「電池不要で動作する電気機器(IC 等)」は現在議論が進む電磁波の干渉評価が終わり、人体への電波ばく露の影響が基準値いかであり、かつ、既存の無線通信システム等との共存が可能となれば、まず実用化されていくものである。現在 RF-ID というワイヤレス給電を一部利用した通信システムが値札等に普及し始めているが、RF-ID は中の IC の情報を無線でやり取りすることに特化した機器であり、空間伝送型ワイヤレス給電はこの RF-ID をより汎用化して様々な電気機器を電池レスで駆動するものと考えればよい。将来の IoT(Internet-of-Things)デバイスとの相性も良く、空間伝送型ワイヤレス給電は IoT 機器普及の鍵となると思われる。結合型ワイヤレス給電にも期待されている「無意識な充電」は、空間伝送型のほうがより適している。ワイヤレス給電距離がより長くできるために、例えば同じスマートフォンのワイヤレス給電であっても、結合型の場合は充電パッドにスマートフォンを置くという動作が必要であるのに対し、空間伝送型では胸ポケットに入れたままのスマートフォンをワイヤレス充電することができるのである。またさらに将来には、ドローン等、移動体/飛行体への電磁波をビーム状に集中させてワイヤレス給電するシステムへの期待も高い。こちらは一般にイメージする「有線の代わりとなる」ワイヤレス給電に最も近いシステムである。

5.4.1.2 将来システムのスペック

a) 結合型ワイヤレス給電

様々な応用に対し様々なスペックが想定される。以下は現在実用化されている結合型ワイヤレス給電システムに基づき、期待されるシステムである。

[スマートフォン] 15W 以上(現状 5W), 効率 90%以上

[電気自動車] 20kW 以上 (現状 7.7kW), 効率 90%以上, 移動中とも併用
[電動バス] 200kW 以上 (現状 100-200kW), 効率 90%以上, 移動中とも併用
[ドローン] 750W 以上 (現状 100W 程度), 効率 90%以上 等

b) 空間伝送型ワイヤレス給電

応用に応じ、期待されるスペックが異なる。

[電池レス小電力デバイス(IC 等)] 受電電力 1mW 以上, 送受電距離 10m 以上

[スマートフォン] 受電電力 数 W 以上, 送受電距離 10m 以上, 効率 10%以上, 目標追
尾型

[ドローン] 受電電力 100W 以上, 送受電距離 50m 以上, 効率 30%以上, 目標追尾型
等

5.4.1.3 将来システムの課題

結合型、空間伝送型ともに、大枠での求める課題は共通している。有線送電に比べ一般に効率が悪いワイヤレス給電をシステムとして考えた場合に、低い効率を補う以上の付加価値が最も重要である。例えば接点が不要となることで製品のデザイン性や放水性が高まる、また寿命が延びる、接続のひと手間が不要となり便利、これはインプラントデバイス等では充電/電池交換時の手術が不要となるという利点ともなる、電池すら不要の電気機器の実現、または無意識充電で常に充電され続ける 2 次電池により電池不要に感じる新感覚、そこまでいかなくとも電池の駆動時間の延長もしくは電池の小型化でも同等時間駆動等、が考えられる。しかしこれらの付加価値は効率という数字と異なり指標化しにくく、実用化を進めることと並行し利便性等を高めるフィードバックをし続ける必要がある。

5.4.2 将来必要となる技術

5.4.2.1 課題解決に必要な技術項目

結合型、空間伝送型ともに、大枠での求める課題は共通している。

高効率大電力新半導体技術、高効率回路技術、高効率/低損失アンテナ/コイル技術、アンテナ/コイルの小型化、受電器の位置補足技術、受電器の位置が変化した場合の高効率維持の技術(結合型の場合は回路パラメータの自動最適化、放射型の場合はビームフォーミング)、ユーザ(課金ユーザ)識別技術と課金手法の確立、予期せぬ不要物の識別/安全確保技術、電磁界/電磁波不要放射抑制技術、等

5.4.2.2 詳細技術の説明と目指すべき技術レベル

上記技術項目は給電に関する高効率化に資する技術項目と、実用化の際に問題となる項目の解決という技術項目に大別される。高効率化は、それが求められるワイヤレス給電と、求められないワイヤレス給電で要求程度は異なるが、給電システムである以上ある程度は必ず求められる技術項目である。ワイヤレス給電の効率は、コイル/アンテナ間の送

受電間効率が注目されがちであるが、高周波電磁界/波を介している以上、電気から電磁界/波、電磁界/波から電気への変換回路の効率も重要である。変換回路効率は多くは半導体回路を用いており、効率の上限値は半導体の効率により決まり、その上限までいかに効率を近づけるかが回路効率となる。そのため最も需要視されるのは高周波半導体そのものとなる。またワイヤレス給電は移動体への給電に最も相性が良いため、小型化も必ず要求される。コイル/アンテナや回路を小型化するためにはより高周波化することが一般的であるが、周波数が高いほど半導体や回路の効率は下がるのが一般的(物理法則)であるため、ここでも半導体や回路の高効率化がキーワードとなる。コイル/アンテナ間の送受電間効率は電磁波の物理法則で上限が決まってしまう、その法則を超えて高効率化をすることは難しい。送受電間距離が長くなるほどコイル/アンテナ間の送受電間効率が下がるのはこの物理法則のためである。コイル/アンテナ間の送受電間効率をさらに下げる要因は距離と共に、同距離であっても平面内の位置関係である。物理法則的には送受電コイル/アンテナは正対している時が最も効率が高い。位置がずれてしまったことを認識して効率を維持する技術はあるが、逆に送受電の位置関係を認識していないと効率は極端に下がるのである。そこで送受電の位置関係の認識技術と、関連する効率維持技術の進化が重要となるのである。

実用化の際に問題となる項目の解決は、さらに既存電磁界/波利用システムとの共存のための技術と、ビジネスとしての利便性/実用性を高める技術に分けることができる。利用者の安全性確保も製品としては必須の技術課題である。後者はすべての製品に共通といっても過言ではない技術課題である。前者はワイヤレス給電固有の課題である。現在すべての周波数は何かしらの目的(通信、放送、リモートセンシング、加熱等)で用いられている。電磁界/波というのは近い周波数ではお互いに干渉するという物理があり、新しい電磁界/波応用技術は、必ず既存電磁界/波利用システムとの共存を図ったうえで実用化しなければ社会に認められない。ワイヤレス給電システムとしては不要な放射を極力抑えたいうえで、既存電磁界/波利用システムと調整を行い、お互いが共存できる条件を見つけることが重要な課題である。

5.4.2.3 新しい技術観点からの将来技術

先に述べたが、有線送電の物理的接触による送電と異なり、ワイヤレス給電は電磁界/波を介する送電であるため、送電規格の動的な変更は可能である。また結合型も空間伝送型も同じ物理法則(Maxwell 方程式)に基づいているため、理論上、結合型も空間放射型も動的に同じシステムを用いることも可能なのである。例えば送受電器が近ければ周波数を下げて電磁界を介して高効率で結合型ワイヤレス給電を行い、送受電器が離れ結合型では効率が極端に低下してしまう場合は周波数を上げて電磁波としてエネルギーを放射して高効率な空間伝送型ワイヤレス給電を行う、ということも可能であり、いくつかの研究論文が発表されている。さらに将来はこのようなシームレスのワイヤレス給電も実現できるか

もしれない。

また電磁界/波を介している以上、電力と情報を同じ電磁界/波で伝送することは技術的には容易である。例えば今 Suica のような NFC は 13.56MHz の高周波磁界で電力/情報を同時伝送しているし、RF-ID は 920MHz の電磁波に電力と情報を同時に乗せている。電力/情報同時伝送ワイヤレス給電の研究も結合型/空間伝送型ともに多数存在する。しかし、通信よりも強い電磁界/波を利用したいワイヤレス給電で情報も同時に伝送すると、電磁界/波に通信と同様の変調をかける必要があり、通信と同様にある程度の周波数帯域が必要となる。強く帯域が必要となるシステムは、既存電磁界/波利用システムとの共存という観点でみるとより交渉が難航することは火を見るより明らかであり、課題となっている。しかしこれはワイヤレス給電の実用化の発展に伴って解決が期待できるかもしれない。将来は Beyond 5G 通信が IoT のみならず自動運転等と一体となって発展していく際に、ワイヤレス給電もその一翼を担うことができると考える。

さらに期待されるのは小型化に関する課題である。小型化は物理的な要求であるが、電磁界/波は物理的な送受電器の大きさに関連はするが厳密には一致しない大きさの空間から送電/受電されるために、物理的には小さいが電磁界/波的には大きなコイル/アンテナが存在すればワイヤレス給電に最も適したものであるといえる。電磁波用のアンテナではこれをスーパーゲインアンテナやスーパーダイレクティブアンテナと呼び、研究が一部では行われているが、ワイヤレス給電は求めるようなものに達しておらず、まだ達することができるか理論的な裏付けがまだない。しかしこの技術要求は求め続けるべき技術であると考えられる。

5.4.3 将来必要となる技術の世界の動向と日本のプレゼンス

5.4.3.1 世界と日本の技術レベル差

a) 結合型ワイヤレス給電

歴史的に見れば結合型ワイヤレス給電は 1980 年代に商品化という観点では世界に先駆け、製品ごとの独自方式で実用化を行っており、この頃は世界をリードしていたといえる。日本の工場内無人配送システムのワイヤレス給電化を推進していた日本のメーカーがニュージーランドの電気自動車ワイヤレス給電の研究に多大な支援をしていたこともある。しかし、この頃は結合型ワイヤレス給電の特徴であり弱点の「送電距離が取れない」という観点が先立ち、あくまで非接触給電という見方がされ、ワイヤレス給電全体としての研究/実用化の底上げ感がなかった。結合型の潮目は 2006 年の米国マサチューセッツ工科大学発表の共鳴送電であり、一方で、スマートフォンワイヤレス充電などの規格統一を目指す Wireless Power Consortium の立ち上げである。これらの出来事により、世界的には一気に結合型ワイヤレス給電の研究の底上げと実用化が促進された。残念ながらこれらのムーブメントに対する日本の学界/産業界の寄与は薄い。現在も 2006 年以降のムーブメントに乗じて日本企業も研究を加速し、特許等も多数出願し、日

本の学界でも新しい理論発展や理論統合等を積極的に行っているが、ワイヤレス給電の世界をけん引しているかといえば疑問である。電気自動車へのワイヤレス給電の規格も総務省を中心に 2013 年前後から日本は世界へ働きかけ、国際団体(ITU や IEC 等)で議論をけん引しており、また研究開発や AGV(Auto Guided Vehicle)等の実用化も専攻はしているが、実際の商用電気バスへの展開や、電動自動車へのワイヤレス給電の製品化では明らかに日本は世界の後塵を拝している。総論としては、日本は国際学会や国際団体でワイヤレス給電の議論はけん引し、細かな技術ではいくつかは世界的にみてよい技術もあり、世界で一定のステータスを得てはいるが、標準化や商品化では明らかに世界に後れを取っているといえる。

b) 空間伝送型ワイヤレス給電

空間伝送型ワイヤレス給電も総論では結合型と大差はない。空間伝送型のオリジナルは 1960 年代のアメリカであり、後追いで 1980 年代から日本で盛んに研究は行われているが、先に国レベルで商品化の認可を得て実用化したのはアメリカのベンチャー企業である(2015 年以降)。日本では米国の認可時には深く行われていなかった共存検討を世界に先駆け行い始め、法制化に向けて動き始めているが、その間に米国 FCC の空間伝送型ワイヤレス給電の認可及び商用化が先行してしまい、1980 年代以降の日本の技術優位性/先行性を生かしたとは全く言えない。また技術優位性がある、例えばビームフォーミング用アンテナ(フェーズドアレイアンテナ)の開発等でも、日本は技術で優位でもコスト意識の低い装置開発が多く、結局実用化への道のりが遠い技術開発となっているのが惜しまれる。空間伝送型も結合型と同じ総論となる。「日本は国際学会や国際団体でワイヤレス給電の議論はけん引し、細かな技術ではいくつかは世界的にみてよい技術もあり、世界で一定のステータスを得てはいるが、標準化や商品化では明らかに世界に後れを取っているといえる。」

5.4.3.2 日本の強み

前述のように製品化や標準化では全く世界に後れを取っている日本であるが、これまでの研究開発の蓄積はまず日本の強みであるといえる。これまでの研究開発の蓄積に基づいた基礎理論の充実と、実用化の障壁となる細かな技術課題の克服は日本の強みであろう。また標準化/法制化の議論を実直に行うのも日本の強みである。しかしこれは逆に日本の弱みのようにも感じる。欧米や中国等ではワイヤレス給電のようなイノベーションと思われる新技術に対し、後発の技術が既存の技術に不利にならないように多少融通を利かせ、先行投資を積極的に行い、ジョブ・オン・ゼ・トレーニング的に技術を発展させている感じがあるが、日本は新技術が完璧なものとなり、既存技術との共存が図れることが確定してからでない、その技術が動き始めないという印象がある。これが強みとなっていた時代もあるため、日本は技術立国と言われた頃もあったが、現在このやり方では世界の技術発展スピードに追い付いていけないように感じる。ワイヤレス給電はまだ世界的には先行

者利益があるが、実用化ではすでに追い抜かれており、巻き返しを至急図らなければならない。

5.4.4 国が取り組むべき技術項目

民間や学界では研究開発がしにくい技術は結果が出るのに時間がかかるような基礎的な研究開発と、多額の資金を要する応用開発であろう。ワイヤレス給電の場合は後者の代表例は新しい半導体の開発である。特に今国内の半導体産業の現状を考えると、国の取り組むべき課題の代表例に見える。また長期視点では、技術のみではないが、法制化の促進と、そのための既存電磁界/波利用システムとの共存に関する研究は国に期待したい。特に民間は現在短期に資金回収ができない/わからない技術への研究投資を極端に嫌がっており、日本では鶏卵問題になってしまっているワイヤレス給電の法制化と技術開発を正の方向に回転させるためには、国によるトリガーを必要としている。一度国によるトリガーがかかれば、わが国はこれまでに培ってきた学界による基礎理論/技術と、高い技術力を持つ産業界が相互に関連しながら急速にワイヤレス給電はわが国が主導する形で発展できると考える。

5.4.5 技術ロードマップ

将来システムと詳細技術の技術ロードマップを図 5.4.1 に表示する。

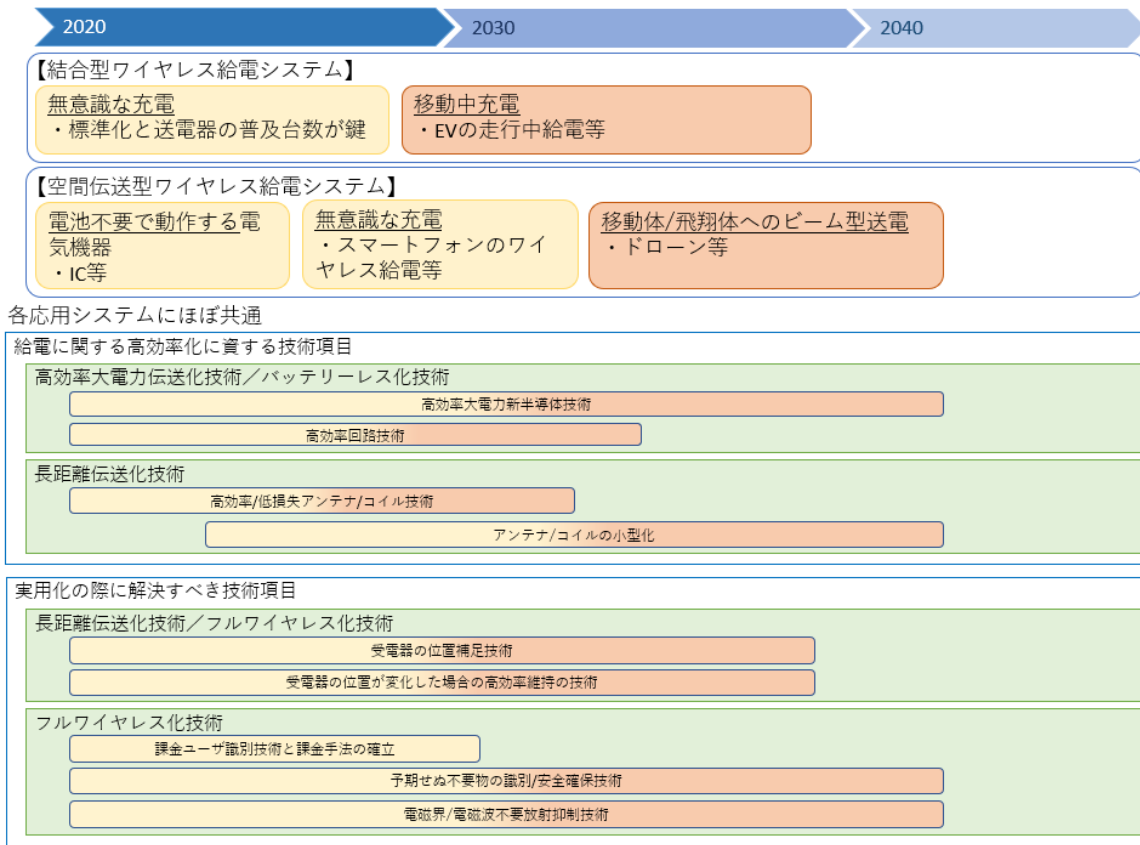
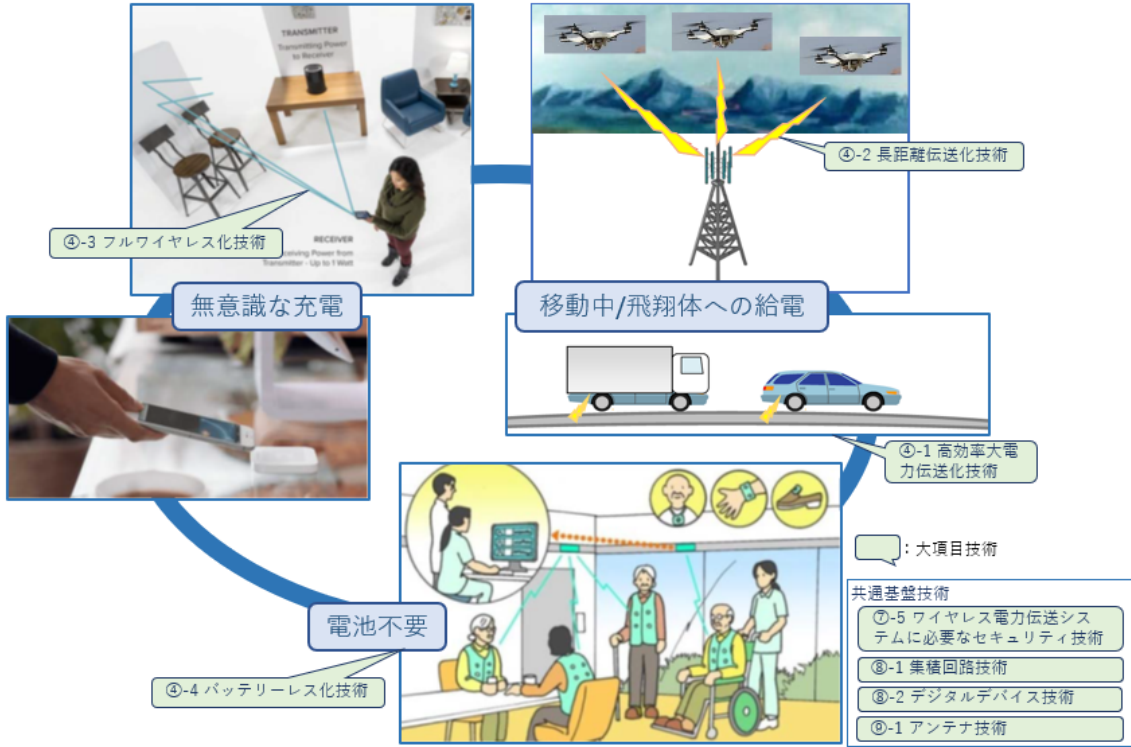


図 5.4.1 電力伝送分野の技術ロードマップ

5.4.6 将来システムのイメージ図

将来システムのイメージ図を図 5.4.2 に表示する。



電波政策2020懇談会報告書（2016年7月）及び情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会 空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班【資料1-5-1】（2019年2月）を基にサイバー創研にて作成

図 5.4.2 電力伝送分野の将来システムのイメージ図

5.5 映像伝送分野

執筆：土田 健一（NHK 放送技術研究所 伝送システム研究部 研究主幹）

執筆協力：中川 仁（放送衛星システム 総合企画室 専任部長）

執筆協力：工藤 栄亮（東北工業大学 工学部 情報通信工学科 教授）

5.5.1 将来動向

5.5.1.1 将来システムへの展望

映像伝送分野においては、ハイビジョン、衛星放送、地上デジタル放送、4K8K スーパーハイビジョンなどの放送分野を中心に、臨場感・実物感あふれる超高精細な映像を伝送すべく進歩・発展している。2018年12月に開始した新4K8K衛星放送は、2020年の本格普及を目指している。さらには、超高精細ディスプレイ、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）などの家庭視聴に関わる技術、フレーム周波数120Hzの高フレームレートに対応する番組制作システム技術、地上波でもスーパーハイビジョン放送を実現するための伝送技術などの開発が進んでいくであろう。

将来の映像伝送システムとしては、2次元スクリーンを飛び越え、3次元空間でリアルな視聴体験をもたらす「空間表現メディア」として、AR (Augmented Reality; 拡張現実)、VR (Virtual Reality; 仮想現実)技術の活用や、自然な3次元映像を楽しむことができるテレビの研究などが進み、2030年頃にはこれらの研究成果を利用した実用化システムの構築が期待されている。

現在、3次元映像は、裸眼で自然な3次元映像が観察できる空間像再生方式の実現に期待が集まる。3次元映像に適したコンテンツなど、認知科学的なアプローチによる研究が進められており、今後どのようなサービスやアプリに結び付くか明らかにしていく必要がある。例えば、デジタルミュージアムなどに3次元映像は一定の用途があると考えられる。美術品の展示などの分野ではホログラムも期待できる。美術品の微細部分（解像度、色調、色深度）まで再現できる要求があるが、動画である必要があるかどうかは検討が必要である。

3次元映像が8K映像を凌駕する魅力あるシステムになるためには、現段階では映像品質が不十分である。しかし、次世代の新しい放送サービスにつながる研究開発は継続する必要がある。例えば、個人視聴用途に限ると技術的なハードルが低くなり、3次元映像の高画質化ができる。そのため、2030年頃には、個人視聴を前提とした携帯型端末用3次元映像を開発してセカンドスクリーン用途を目指し、2040年以降には、多人数で同時視聴できる高品質な3次元映像の実現に進むといった、段階的に技術開発を行うのが現実的である。

5.5.1.2 将来システムのスペック

8K放送が始まり、解像度だけでなく色調表現（深度）もあがっている。将来のシステムとしては3次元映像が考えられるが、8Kを超える魅力をもつコンテンツやメディアがまだ発展途上であるため、3次元映像を映し出すインテグラル方式やホログラムに移るべ

きかわからないとの意見もある。

また、HMDでVRを視聴できる環境が出てきており、単一の映像容量の増加だけではなく、多地点のカメラ画像を同期して送るようなシステムでの大容量伝送も必要となる。

さらに、ユーザインタフェース技術として、身体機能劣化補助の高度化が期待される。高齢化社会が進み、身体機能低下を補うユーザインタフェースはますます重要になると考える。

5.5.1.3 将来システムの課題

8Kの実現により映像システムは2次元映像の究極に近づいていると考えられ、今後は、AR、VRも含めた3次元映像の伝送、高精細化に向かっていくだろう。

まず、3次元映像を生かせるアプリ/サービスの発掘とコンテンツ制作技術が重要な課題である。単に映像・音声を撮影・収録するだけでなく、被写体の立体形状や質感、手触り、声や音の響きなどの情報も取得する高度なコンテンツ制作技術が必要となってくる。

また、3次元映像サービスにはいろいろな方角からの映像を再生するためのデータが必要なため、通常の2次元映像情報の数百倍の情報量となる。これらの3次元映像情報を伝送するためには、高効率に映像を圧縮・符号化し伝送する技術が課題となるであろう。それには高効率に映像を圧縮するための映像符号化技術と、変調方式、誤り訂正などの伝送路符号化技術の双方の技術を進展させる必要がある。また、3次元映像情報にはいろいろな形式があるため、これらを統一した共通フォーマットの規格化や各種形式間での変換技術も課題である。さらに、映像伝送にはリアルタイム性も重要な要素であり、低遅延な符号化技術・伝送技術も課題となる。大容量の情報伝送に向けては、放送用新規周波数の開拓も重要であろう。衛星放送など高い周波数を利用するためには、降雨減衰補償技術、アンテナ技術やビーム制御技術などが課題となる。

また、3次元映像の提示部分においても、視野を覆う映像を表示できるディスプレイ技術やスクリーンのサイズや解像度に応じたコンテンツ提示技術が課題となる。また、スクリーンや携帯型端末（セカンドスクリーン）との通信の大容量化、高速化は、ユーザインタフェースを高度化する上での課題と考える。リアルタイムの映像生成においては、処理をローカルの端末側で行うか、クラウド上で行うかというように、デバイスの争いではなく、ネットワークを含めたアーキテクチャの争いとなることが想定される。

一方、従来の2眼式などの3次元映像システムでは、視覚疲労が課題となっている。現在は、裸眼で自然な3次元映像が表現できる空間像再生方式の技術開発や、効果的なコンテンツは何かを認知科学的なアプローチで調査する動きが始まっており、今後ますます重要になっていくと思われる。

5.5.2 将来必要となる技術

5.5.2.1 課題解決に必要な技術項目

映像伝送分野において、課題解決に必要なとなる技術項目を表 5.5.1 にまとめる。

表 5.5.1 課題解決に必要なとなる技術項目

技術分野	技術項目
高精細映像伝送技術	<ul style="list-style-type: none"> ・高効率符号化技術 ・低遅延符号化技術 ・大画面ディスプレイ作製技術 ・8K を超える高精細映像伝送技術 ・遠隔医療・遠隔監視への応用技術
3次元映像伝送技術	<ul style="list-style-type: none"> ・3次元映像の圧縮符号化・映像フォーマット変換・伝送技術 ・裸眼3次元ディスプレイ技術 ・ホログラム技術 ・3次元映像コンテンツ制作技術
ユーザインタフェースの高度化技術	<ul style="list-style-type: none"> ・AR/VR を活用した映像視聴スタイルの実現技術 ・AI 活用インタフェース技術 ・端末へのダウンリンクのワイヤレス化技術 ・身体機能劣化補助の高度化技術
ワイヤレスと BMI (Brain Machine Interface) との連携技術	<ul style="list-style-type: none"> ・眼球への直接プロダクション技術 ・感性情報工学や人間（人体）情報工学を取り入れた BMI 技術の開発とそれに適合したワイヤレス技術の付加
その他の技術	<ul style="list-style-type: none"> ・衛星放送用新規周波数の開拓 ・イメージングのワイヤレスへの応用 ・放送の宅内光配信システム ・D2D マルチホップ TV 伝送 ・画像認識技術 ・映像センサー技術

5.5.2.2 技術項目の詳細説明と目指すべき技術レベル

映像分野において課題解決に必要なとなる技術項目の詳細説明として、必要性と目指すべき技術レベルを述べる。

⑤-1 高精細映像伝送技術

(ア) 高効率符号化技術

無線伝送に利用できる周波数資源は限られており、映像サービスの高度化を将来にわたって継続して発展させていくためには、限られた無線周波数、限られた伝送容量の中で、より少ないデータ量で高精細映像を伝送するための符号化技術の進展が不可欠である。例えば、大画面ディスプレイでメインコンテンツを表示しながら、興味のあるシーンや目線

の異なるシーンなどを個人の携帯端末に映し出して楽しむことなどができるようになる。このような視聴スタイルを実現するためには、8K の高精細映像に加えて、映像に付随するさまざまなサブコンテンツ情報も同時に伝送・表示することが可能な大容量伝送技術の開発が不可欠である。そのためには、高効率に映像を圧縮するための映像符号化技術と変調方式、誤り訂正など伝送路符号化技術の双方の技術を進展させる必要がある。また、120 Hz 等のフレームレートを実施する上では、伝送すべきビットレートが増えてしまうため、映像符号化において効率的な圧縮を行い、60Hz のフレームレートの場合と比較しても伝送容量があまり変わらないようにする必要がある。

(イ) 低遅延符号化技術

VR 映像等に代表されるインタラクティブなシステム（ユーザの操作に応じ、サーバーから配信する映像を変化させるシステム）では、より自然な映像を体感するために低遅延性が極めて重要となり、映像伝送のための低遅延符号化技術が必要である。

(ウ) 大画面ディスプレイ作製技術

宅内で 8K 等の高臨場感映像を楽しむためには、壁全体に表示できるフレキシブルな大画面ディスプレイの開発が必要となる。軽量で持ち運びを容易とするために、対角 100 インチ超でも厚みを 1mm 以下とすることなどが要求され、実現に向けては塗布形成などの大型パネル作製技術の開発が重要であると考えられる。また、大画面ディスプレイに加えて、ウェアラブルや折りたたみディスプレイなどさまざまなタイプの携帯端末も普及し、大画面ディスプレイでメインコンテンツを表示しながら、興味のあるシーンや目線の異なるシーンなどを個人の携帯端末に映し出して楽しむことなどができるようになる。このように多様な視聴スタイルを実現するためには、8K の高精細映像に加えて、映像に付随するさまざまなサブコンテンツ情報も同時に伝送・表示することが可能な大容量伝送技術の開発が不可欠である。

尚、多様な視聴スタイルにおいては、スクリーンのサイズや解像度に応じたコンテンツ提示技術の開発が必要である。

(エ) 8K を超える高精細映像伝送技術

遠隔医療等への応用を考えると、全体を見たい時は 8K で良いかもしれないが、ある部分を拡大して見る必要がある場合は、元の画像をさらに高精細にしておく必要がある。8K は TV 用ディスプレイとしては優良かもしれないが、遠隔医療などへの応用を検討する上では解像度等の進化は必要である。

(オ) 遠隔医療、遠隔監視への応用技術

遠隔医療や交通管制などの遠隔監視に高精細画像を利用する場合、リアルタイム性が要求され、圧縮・伸張処理による遅延が問題となるため、低遅延の伝送が必要となる。

⑤-23 次元映像伝送技術

(ア) 3次元映像の圧縮符号化・映像フォーマット変換・伝送技術

特別な眼鏡をかけることなく自然な3次元映像を見ることができる空間像再生型の3次元映像方式が次世代の放送メディアとして期待されている。近年、光線再生(ライトフィールド)技術による3次元映像表示技術が活発に研究開発されている。3次元情報としては、様々な視点映像を再生するための情報が必要なため、通常の2次元映像情報の数百倍の情報量が必要である。そのため、3次元映像情報を高効率に圧縮・符号化し伝送する技術の開発が重要となる。また、3次元映像情報にはいろいろな形式があるため、これらを統一した共通フォーマットの策定や各種形式間での映像変換技術も重要となる。

(イ) 裸眼3次元ディスプレイ技術

3次元映像方式には、古くは右眼と左眼に異なる映像を提示する2眼方式がある。シンプルなシステムで画質の良い3次元映像を観察できる反面、特別な眼鏡をかける不便さと視覚疲労の問題があり、放送分野では実用化されていない。近年、光線再生(ライトフィールド)により空間に光学像を形成する3次元映像表示方式が活発に研究開発されている。本方式では、原理上、2眼方式で課題であった視覚疲労の問題を解決できる可能性がある。裸眼で様々な観察位置からどのような姿勢でも、実物を見るのと同様に自然な3次元映像を見ることができる可能性が出てきた。

本方式で映像品質を向上するには、多くの光線を再生する必要がある。そのために、高精細な映像技術を3次元映像表示に応用したり、複数の映像を合成し画素数を向上したりする技術が開発されつつある。今後、8K映像が本格普及し、現在より高精細映像がより一般的に利用できるようになることで、3次元映像の高品質も進むと期待される。

また、3次元映像の実用化においても、まずは個人視聴に限定した携帯型端末用の3次元映像表示を早期に実現することを目標とすることで、技術開発のハードルを下げる事ができる。さらに将来的には、複数人で視聴できより高精細な3次元ディスプレイに進展していくように、段階的に開発を進めるのが現実的である。

(ウ) ホログラム技術

ホログラム技術とは、光の波長程度の微細な干渉縞にコヒーレントな光を照射し、回折した光の干渉によって3次元映像を記録・再生する技術である。物体を立体的に知覚するための4つの要因(輻輳、焦点調節、両眼視差、運動視差)をすべて満足する空間像再生方式である。そのため、過去の3Dブームに用いられた二眼式や多眼式とは異なり、疲労がなく、特別な眼鏡も必要なく、自然な3次元映像を表示することができる。

30度以上の広い視域を得るためには、干渉縞を表示するディスプレイ(「空間光変調器」と呼ぶ)の画素ピッチを、画面サイズに関係なく、1 μ m以下にする必要がある。そ

のため、画面サイズの拡大とともに総画素数も増大する点が、従来の2次元表示ディスプレイと大きく異なる。また、ホログラム再生像の画質は、画素数や階調数に依存しており、単色で画素数100k×100k（画面サイズ10cm程度）以上、階調数5値（3ビット）以上が理想的と考えられる。したがって、30Hzの3次元映像を非圧縮の干渉縞データとして伝送する場合、100k×100k×3色×30Hz×（階調1～3bit）≒1～3Pbpsの伝送容量が必要となるものの、水平視差に特化したパネルや、AR/VR応用に向けた小型パネルでは、総画素数を大きく低減できるであろう。2019年の国際ディスプレイワークショップ（IDW'19）では、韓国のETRIが、72k×3.2k（画面サイズ7.2cm×3cm程度）、4bit、24Hz、3色の水平視差に特化した液晶空間光変調器を、2021年4月までに開発することを宣言しており、これが成功すれば3次元映像技術の大きな進展が期待される。

さらに、少ない画素数の空間光変調器パネルを複数個並べてタイリングすることで、大画面化を図る技術の進展も考えられる。その場合、各パネルの配線取り回しを考慮すると、各パネルに向けて、映像信号をワイヤレスで同時伝送する技術も必要になるのではないかと思われる。

（エ） 3次元映像コンテンツ制作技術

8Kを超える魅力あるメディアを制作する技術が必須である。3次元映像が生かせるアプリ/サービスの発掘とコンテンツ制作については、まずは3次元映像に適したコンテンツを調べる必要がある。そのコンテンツも個人視聴用の携帯型端末の3次元ディスプレイと、より大きな画面の複数人視聴の3次元ディスプレイとは異なるため、認知科学的なアプローチにより3次元映像の効用を調べる研究を進めていく必要がある。

将来の映像コンテンツの制作では、被写体に関するさまざまな情報が活用される。単に映像・音声を撮影収録するだけでなく、被写体の立体形状や質感、手触り、声や音の響きなどの情報も取得するコンテンツ制作技術も必要になる。VFX・超解像により映像を生成する新たな映像処理技術も活躍するであろう。

3次元映像伝送技術については、医療用などB2Bに利用できるかも鍵となる。今後、自然な3次元映像を再現する光線情報であるライトフィールドの圧縮符号化方式の標準化の検討が進んでいくであろう。

⑤-3 ユーザインタフェースの高度化技術

（ア） AR/VRを活用した映像視聴スタイルの実現技術

ARやVRの進展が加速している。放送で流れているニュースや番組と連動したVR映像、AR映像を通信経由で届けることで、新しい視聴スタイルが提供できる。テレビ映像と3次元ARコンテンツに絶対時刻のタイムスタンプを付与して配信し、テレビの2次元映像とタブレット端末の3次元ARコンテンツとを高精度に同期させることで、例えばテレビの中の演者が自分の部屋に飛び出してくるような従来のテレビの枠を超えた新たな視聴体験を実現できる。

(イ) AI活用インタフェース技術

技術の高度化に伴い、便利な機能が実装されている一方で、操作の難易度が上昇しているという意見が散見される。近年、AI技術の進展により、人の行動をAIにより認識したり、次の行動をサポートしたりする提案が多数なされている。音声認識、人物認証など、個々の技術のより一層の改善を進めるとともに、さまざまなAI技術を複合的に利用することで、より使いやすく便利なユーザインタフェースの実現が期待される。

(ウ) 端末へのダウンリンクのワイヤレス化技術

モニタ用のケーブルのワイヤレス化、ウェアラブル端末へのダウンリンクのワイヤレス化、バイザーや眼鏡などのウェアラブル機器から平面スクリーンに投影する技術、動く端末へのビームアライメント等、端末とのやり取りのワイヤレス化はユーザインタフェースを高度化する上で重要な要因となる。

(エ) 身体機能劣化補助の高度化技術

高齢化社会がますます進み、身体機能低下を補うユーザインタフェースは重要になる。ユーザインタフェースの高度化については、「感覚」の操作がどこまで進むかがポイントである。

⑤-4 ワイヤレスとBMIとの連携技術

(ア) 眼球への直接プロジェクション

脳に直接ではなく人間のセンサー＝眼球に直接プロジェクションをするという「網膜投影型ディスプレイ」がより発展すると考えられる。映像の伝送だけでなく視力矯正などへの応用も期待できる。

(イ) 感性情報工学や人間（人体）情報工学を取り入れたBMI技術の開発とそれに適合したワイヤレス技術

同じ映像を伝送する際にも、BMIデータと通常の映像データは異なるので、BMIデータを送るのに適したワイヤレス技術の開発も必要となるであろう。

脳信号のフィルタリングについては、必要情報の抽出技術と、それ以外は不可侵とするセキュリティ技術の両方が必要である。また、脳へのフィードバックの安全性も必須となる。

また、脳波を読み取る研究はあるが、脳に画像を直接インプットする研究は希である。現状で脳に映像を送り込む技術はまだ科学研究の領域（Scientific）で moon shot 的（実現が困難だがインパクトが大きい）な状況だと考えられる。

BMIの課題としては、脳の感覚など言語化できない“手法”の伝え方や、使い方のトレーニング方法などであろう。このようなことを踏まえると、実用化には少し先の技術である

と想定される。

5.5.2.3 新しい技術観点からの将来技術

(1) 衛星放送用新規周波数の開拓

現在の衛星放送は 12 GHz 帯を使用している。衛星放送用の周波数帯としては、日本を含むアジア・太平洋地域には、12 GHz 帯の上は 21 GHz 帯が割り当てられている。しかし、Ka 帯である 21 GHz 帯を衛星放送に使用している国はまだなく、Ka 帯の電波は降雨による減衰が大きいことなどから、基本的には降雨減衰補償技術が必要となる。そのためには、雨の降っている地域の電波を増力させるなど、アンテナ技術やビーム制御技術などが必要になる。

(2) イメージングのワイヤレスへの応用

端末の周囲映像により、通信方式を最適化する。映像（2次元の光・色情報）により場所、時間等を特定し、場所、時間による通信状況等をためた「ビッグデータ」を解析して最適な通信（周波数・時間・空間の利用効率が向上）をする無線通信技術も検討されていくであろう。

(3) 放送の宅内光配信システム

戸建てや集合住宅においては、12GHz 帯衛星放送の受信信号は受信アンテナ出力において 1GHz~3.2GHz の中間周波数帯（IF 周波数）に変換されて各住戸や部屋に配信されている。今後、21GHz 帯などの新しい周波数による衛星放送に対応するためには更なる帯域が必要となるが、高周波数帯への帯域拡張は同軸ケーブルの損失が課題となる。今後は、光ファイバによる ROF（Radio on Fiber）を利用した、広帯域、低損失かつ漏洩電波が非常に小さい光配信システムに移行していくことが期待される。

(4) D2D マルチホップ TV 伝送

D2D(Device to Device)は少量伝送というイメージだが、マルチホップでリアルタイム TV 伝送を D2D でというアプリケーションも考えられる。

(5) 画像認識技術

画像認識は IoT、自動運転でも必要となる技術である。映像の中から、必要な情報のみを抽出する技術が必要となってくる。

(6) 映像センサー技術

映像センサー分野では、トンネル出入り時の光量変化に対応する技術や、高速で移動する物体をゆがみやボケなく鮮明に撮影する技術、映像の 3次元情報を取得する技術などの進歩が必要である。

5.5.3 将来必要となる技術の世界の動向と日本のプレゼンス

5.5.3.1 世界と日本の技術レベル差

有識者のアンケートにより、諸外国と比べた日本のレベルを考察した。

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| ・高精細映像伝送技術 | 日本のレベル 2.2 (やや優れている) |
| ・3次元映像伝送技術 | 日本のレベル 2.25 (やや優れている) |
| ・ユーザインタフェースの高度化技術 | 日本のレベル 2.2 (やや優れている) |
| ・ワイヤレスと BMI との連携技術 | 日本のレベル 3.0 (諸外国と同程度) |

5.5.3.2 日本の強み

高精細映像伝送技術については、日本の技術開発力の優位性が世界的に認知されていると考えられる。日本発の高精細映像技術「ハイビジョン」は世界に広く普及し、放送のみならず OTT (Over The Top) や医療・芸術等の幅広い産業に活用されている。2018 年に世界初の 8K 放送が実現されたことが示すように、現在も高精細映像伝送技術分野において日本が世界を牽引している。特に、コンシューマ機器と比較して格段に高い性能を要求されるプロフェッショナル機器においては、8K 等の超高精細映像の撮像に必要なレンズ、カメラに加え、その映像を放送番組等コンテンツとして作成するための制作システム機器に関して、日本メーカーは圧倒的なプレゼンスを示している。

3次元映像伝送技術について、日本は、1990年代後半よりライトフィールド方式の起源であるインテグラル3D方式の研究に着手した。その後、本分野で他国に先行した数多くの研究成果を有している。また、ライトフィールド符号化の標準化において、日本のメンバーが主導している。

ユーザインタフェースの高度化技術については、高齢者にもやさしいユーザインタフェースや AR・MR(Mixed Reality: 複合現実)を用いたユーザ操作の補助、AIによるユーザ操作の補助および自動化の技術において強みがある。

5.5.4 国が取り組むべき技術項目

国が業界や学会と一緒に取り組むべき協調領域と具体的技術項目を挙げる。

限られた無線周波数、限られた伝送容量の中で、より少ないデータ量で高精細映像を伝送するためには、映像符号化技術、伝送路符号化技術の開発が必須となる。取り組むべき技術領域は、放送、通信の垣根がなくなっており、国をあげての取り組みをすべき領域と考える。

3次元映像伝送については、放送分野だけでなく、さまざまな分野での応用技術が考えられる。裸眼で自然な3次元映像が観察できる空間像再生方式の実現に向けた技術開発や、表示方式の認知科学的な検討も国が業界や学会と一緒に取り組むべき協調領域と考える。

ワイヤレス技術と BMI の連携も、脳信号のフィルタリング技術、セキュリティ技術、

安全性の担保など、幅広い領域の協調により成立する分野である。将来、BMI データを送るのに適したワイヤレス技術を検討する段階では、国をあげての取り組みとすべき領域と考える。

衛星放送用新規周波数の開拓についても、周波数政策と密接な関係を持つことから国をあげての取り組みをすべき領域と考える。

5.5.5 技術ロードマップ

将来システムと詳細技術の技術ロードマップを図 5.5.1 に表示する。

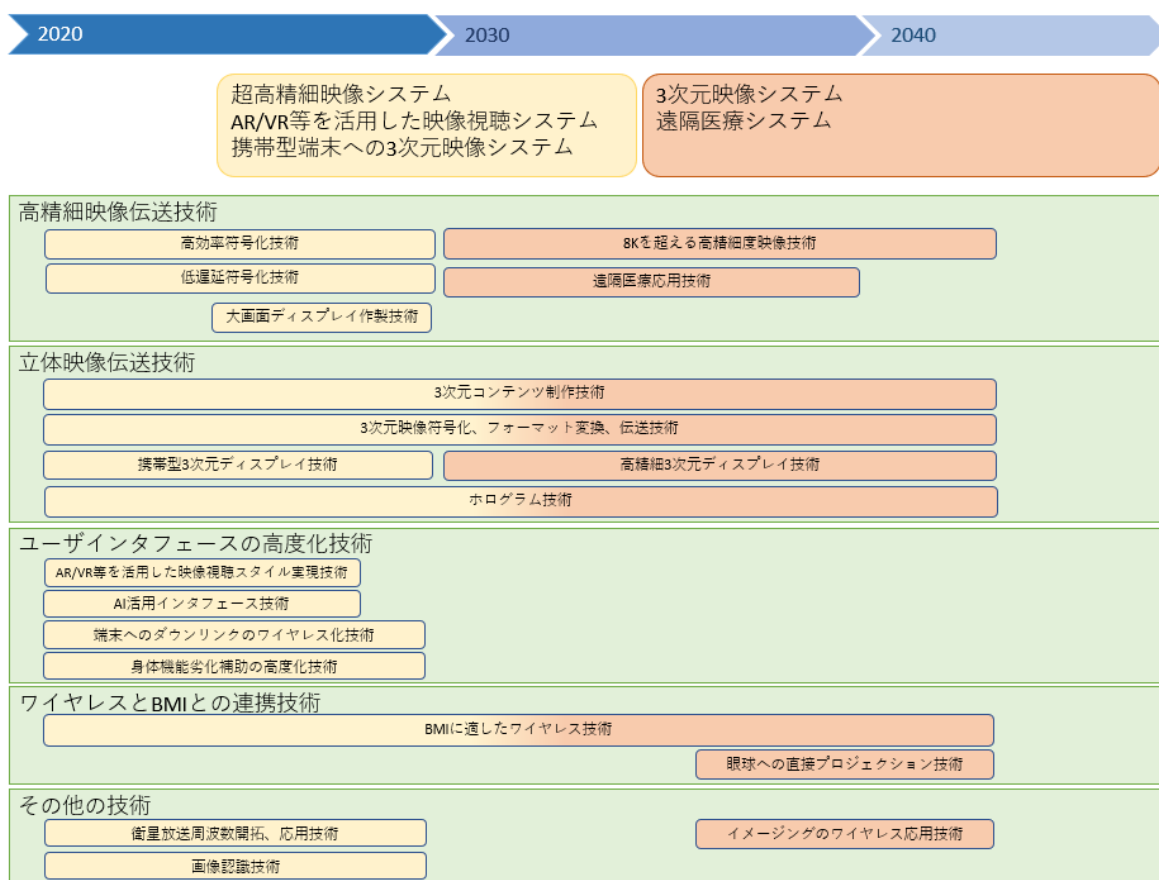


図 5.5.1 映像伝送分野の技術ロードマップ

5.5.6 将来システムのイメージ図

将来システムのイメージ図を図 5.5.2 に表示する。



NHK放送技術研究所 技研公開2019展示資料を基にサイバー創研にて□のテキストボックスを追加作成

図 5.5.2 映像伝送分野の将来システムのイメージ図

5.6 モビリティ分野

執筆：重野 寛（慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 教授）

執筆協力：須田 義大（東京大学 生産技術研究所 次世代モビリティ研究センター 教授）

執筆協力：小花 貞夫（電気通信大学 産学官連携センター長 特任教授）

5.6.1 将来動向

5.6.1.1 将来システムの展望

情報通信技術（ICT）を用いて、時間、場所、状況に制約されずに、安全・安心で利便性の高い「人とモノの移動（モビリティ）」が実現する。モビリティの高度化を通じて、社会全体で交通を効率化するとともに、様々な社会的課題の解決を計ることが期待されている。特に自動車を取り巻く状況はこの10年で大きく変化している。CASE、すなわち、Connected（接続性）、Autonomous（自動運転）、Shared（シェアリング）、Electric（電気自動車）をキーワードとして、次世代自動車の研究開発が加速している。交通における安全・安心の実現、そして自動車のネットワーク化と大規模な情報処理基盤を前提とする高度なサービスの実現に向けた研究開発が活発化している。さらに、様々な移動手段を統合して移動をサービスとして再構築するモビリティ・アズ・ア・サービス（Mobility as a Service; MaaS） [1] が注目されている。これらの変化は同時並行的に進行しており、技術的な研究開発、サービスやビジネスのあり方、社会の仕組みや制度に対して、大きな変化をもたらそうとしている。

モビリティの進化にとって自動運転は大きな要素である。その実用化に向けて、世界的に研究開発が加速しており、法制度などの社会制度に関する検討も始まっている。日本では総合科学技術・イノベーション会議が司令塔となり、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）自動走行システム（第1期 2014-18年度、第2期 2018年度-）が推進されている。この課題では、2025年を目処に高速道路における自動運転（SAEレベル4）を実現することを目指している。関連して、低炭素社会の実現に向けた自動車走行技術やトラックの自動隊列走行などの研究も進められている。

自動運転の発展や高度な自動車向けサービス提供のためには、自動車のコネクテッド化（ネットワーク化）が重要である。通信を利用することにより、自律的な自動運転をさらに発展させ、車両が他の車両や路側インフラとの間で互いに連携する協調走行の実現が期待される。衝突防止などの安全安心運転の支援では自動車間の直接通信が必要不可欠であり、将来の自動運転・協調走行においてもその役割は大きい。加えて、2015年頃から米国を中心にコネクテッドカーが提唱され、自動車の広域ネットワークへの接続と情報化に期待が集まっている。コネクテッドカーでは、自動車の車載センサーからの情報を収集し、クラウドへ集積して分析することで、高い付加価値を提供するサービスの実現が期待されている。例えば、高度な3次元地図情報や大規模な交通情報の提供はすでに実用化されつつある。また、都市レベルの交通制御やエネルギー効率化、カーシェアリングやテレマティクス保険などの新ビジネスの実現が想定される。

自動運転・コネクテッドカーは第5世代移動通信システム（5G）の重要なキラーアプ

りのひとつと目されており、2030年に向けた次世代ネットワークに向けた検討 [2] [3] や次世代移動体通信システムである Beyond-5G (B5G)、6G に向けた議論 [4] でも重要なユースケースに位置付けられている。また、ビッグデータ処理、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といった、先端的な情報処理・情報サービス基盤とも関係が深い。将来の方向として、通信、センシング、制御、情報処理の融合や、機械学習・AI 技術による通信ネットワーク制御やサービスの自動化の実現が考えられる。

自動運転や自動車のコネクテッド化・情報化に後押しされる形で、自動車交通を超えて様々な移動手段を統合して、陸・海・空にまたがる移動を一貫したサービスとして提供する「ひとつのサービスとしてのモビリティ」(MaaS)への動きも活発になってきている。我々の周囲には、自家用車や、バス、タクシー、鉄道、航空機などの公共交通機関、さらにレンタカーや自転車のシェアリングなど、様々な移動手段がある。MaaSでは、これらの異なる事業者が提供する多様な移動手段を統合して、ユーザのニーズに合うドアツードアの移動(トリップ)をオンデマンドで提供する。

MaaSによるモビリティの変化は、個人から社会まで広範な効果が期待されている。例えば以下に挙げるような可能性がある。

個人の移動性や利便性の向上：ユーザニーズに合わせて、複数の交通手段にまたがるドアツードアの移動手段の検索、予約、利用、決済等を一体のサービスとして提供する。

交通機関における運営の改善：公共交通機関の利便性向上や運行の効率化により、運賃収入の増加、収益の改善などが期待できる。また、交通ニーズを把握し、オンデマンドバス等の代替交通手段の導入などにより、公共交通機関の効果的な運営の実現も期待できる。

地域の特性に合わせた持続的な移動サービスの実現：都市部と地方では異なる交通課題に直面しており、地域ごとに適切な解を提供する必要がある。例えば、人口の集中する都市部においてはライドシェアへの移行などにより渋滞の軽減や解消が期待できる。一方、地方においては自動運転や交通データ活用による効率化や、自動運転やライドシェアによりラストワンマイルの移動手段を確保できる。また、自家用車から交通機関のシフトにより、環境負荷を軽減が期待できる。

5.6.1.2 モビリティに関わる想定されるスペックや課題

(1)自動運転技術

モビリティ分野の将来動向は自動運転の動向と大きく関係している。自動運転の実現レベルとして SAE International J3016 (2016.09) / JASO TP 18004 (2018.02)にて5つのレベルが定義されている。自動運転システムは特定の条件のもとで機能するため、実現レベルはその前提となる制約条件をセットで考える必要がある。このような自動運転に関する制

約条件は限定領域（ODD; Operational Design Domain）と呼ばれており、地理、路面状況、天候、交通状況、速度、時間などに関する条件が含まれる。自動運転の実現レベルは、車両が自家用車なのか、トラックなどの業務車両なのか、対象車両によっても異なる。

現在の自動運転技術の研究開発については SAE レベル 3 以上が主な目標である。SAE レベル 3 条件付自動運転では「運転自動化システムが全ての動的運転タスクを限定領域において持続的に実行」するが、自動運転作業が困難な場合は運転者が対応する必要がある。SAE レベル 4 高度運転自動化では「運転自動化システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を限定領域において持続的に実行」する。SAE レベル 5 完全運転自動化では特に限定領域を設定せず、システムがすべての動的運転タスクを実行する。

自動運転の実現時期について、SIP 自動走行システムでは、2025 年を目処に高速道路における自動運転（SAE レベル 4）を実現することを目指している。官民 ITS 構想・ロードマップ 2019 [5] でも、自家用車やトラックの高速道路における SAE レベル 4 を 2025 年前後に実現すること期待している。限定領域を設けない SAE レベル 5 完全自動運転化は、その後、2035 年から 2040 年に向けて研究開発が進むと思われる。ただし、高度な自動運転であっても限定領域を狭めれば、例えば、駐車場に限定した自動バレーパーキング（SAE レベル 4 に相当）は、数年のうちに商品化される見込みである。

自動運転の技術要素 [6] としては、位置評定技術（測位とマッピング）、周辺環境認識（センシングとパーセプション）、認知・予測・判断機能、走行経路計画、走行制御、協調制御、セキュリティ、外界との HMI（Human Machine Interface）などが考えられる。これらの技術のいくつかについては、通信による外界との情報交換による高度化が期待できるため、コネクテッドカー技術が基盤技術となる。

(2)コネクテッドカー技術

自動車に関する通信には、自動車間の直接通信である車車間通信（V2V 通信）、自動車と路側設備の間の路車間通信（V2I 通信）、自動車と歩行者などとの通信（V2P 通信）、自動車とネットワーク上のクラウドサービスとの間の通信（V2N 通信）などがある。これらの通信を含め自動車に関係する通信すべては、V2X 通信と総称されている。

車車間通信や路車間通信には、ともと出会い頭の衝突防止などの安全運転支援や ETC などの自動車専用のサービスが想定されてきた。このため、比較的狭いエリアを対象とした自動車専用の通信方式である DSRC（専用狭域通信: Dedicated Short Range Communication）が日米欧で研究開発されてきた。日本では、ETC で用いられている狭域通信システム（ARB-STD-T75）や 700 MHz 帯高度道路交通システム（ARB-STD-T109）が、欧米では IEEE 802.11p がそれぞれ実用化されている。

一方でコネクテッドカーが提唱され、広域ネットワークにより自動車をクラウドなどと

接続し、高度な情報サービスを実現する需要が顕在化している。このような広域通信（V2N 通信）についてはセルラー通信システム、特に広帯域な通信を提供する第 5 世代移動通信システム（5G）の利用が見込まれている。さらに、車車間・路車間通信についてもセルラー通信方式を用いるセルラーV2X（C-V2X）が提唱されており、歩行者等との通信も含めて自動車に関する全ての通信をセルラー通信方式によって実現する方向も出てきた。LTE の V2V/V2I/V2P 通信である LTE V2X は 3GPP Release 14 で策定済みであり、5G 技術による NR-V2X の策定も進められている（2020 年に 3 GPP Release 16 にて策定見込み）。V2V/V2I/V2P 通信ではセルラーV2X と DSRC とが競合することから、どちらで普及が進むのか、あるいは何らかの役割分担がなされるのか、さらに将来、自動車通信が全体してどのように統合化されるのかなどが、課題である。

コネクテッドカー技術は自動運転と協調走行と密接な関係がある。現在の自動走行は、高精度地図などの比較的静的な情報、車両が持つローカル・センサーからの情報をもとにした自律走行が前提である。しかし、周辺環境認識や交差点等での他車両や信号との協調、歩行者との意思疎通などにおいては通信の活用が見込まれる。さらに隊列走行や高速道路での合流などの高度な協調走行においてはローカルな自動車群での密な通信が必要不可欠である。このような動的な環境の中での協調走行のためには、高速道路での渋滞や多数の自動車や歩行者に囲まれる大規模な交差点のような過密で動的に変化するようなモビリティ環境においても、超低遅延かつ高信頼の可用性の高い通信が必要である。また、V2N 通信については、自動運転車が生成する膨大なセンシング情報や走行情報をクラウドに集積するために超広帯域通信が必要であると同時に、このような情報を活用するためのビッグデータ連携基盤や AI 処理技術も重要である。

(3)コネクテッドモビリティ技術

MaaS におけるモビリティの統合は、移動手段の統合に止まらず、以下のような段階があるとされている [7]。

1. 移動に関する情報の統合：マルチモーダルな交通の計画や価格情報の提供
2. 予約や決済の統合：1 トリップの検索，予約，決済の実現
3. サービス提供の統合：モビリティサービス間や他のサービスとの統合、定額制の導入
4. 政策の統合：データ分析等による社会課題の解決に向けた統合

これらのモビリティの統合はその範囲や規模も異なるが、大きくデータ収集、データ処理・分析、サービス生成、サービス提供の段階があり、ICT システムが重要な基盤となる。

将来の鍵となる技術は多岐にわたるが、以下のような技術をあげることができる。現在、MaaS に関係する実証実験が実施・計画されている。具体的な要求条件や課題につい

では、これらの結果から得られると考えられる。

- リアルタイムの移動体や交通環境の情報の収集・交換を可能とする通信ネットワーク技術
- 都市規模の膨大な情報を処理するための大規模情報処理基盤技術（分散処理や量子コンピューティング）
- 異なる組織・業種を超えたデータ交換、処理の統合のためのシステム連携技術（例えば、データフォーマット、メタデータ、マッシュアップ技術、API など）
- 機械学習や AI 技術などによるデータ分析・予想・判断技術
- 交通や人流を制御するための技術

5.6.2 将来必要となる技術

⑥-1 コネクテッドカー技術

主として将来の自動車に接続性（コネクティビティ）を提供するための通信技術の確立や高度化に関する技術を取り上げる。

（ア）次世代車車間・路車間通信技術（DSRC、セルラーV2X、ミリ波・テラヘルツ波自動車通信）

日本においては既に ARIB-STD-T109 などのいくつかの DSRC 規格が実用化されているが、自動運転・協調走行時代の自動車に関連する通信需要を満たすためには、先端的な無線通信技術を導入して DSRC の高度化を図る必要がある。一方、セルラーV2X ベースの V2V/V2I 通信技術である 5G NR-V2X（3GPP Release 16, 2020 年に策定見込み）が注目されており、狭域通信のあり方を整理する必要がある。さらに 2030 年に向けて、次世代の移動体通信システム（B5G、6G）の研究開発が必要である。

車車間・路車間通信では渋滞や大規模な交差点等、車両密度が高い状況においても安定した通信性能を維持できる必要がある。長期的には、リッチなセンシング情報の交換などのために通信の大容量化が求められる。ミリ波帯・テラヘルツ波の車車間・路車間通信技術や可視光通信の研究開発も重要になると考えられる。指向性が高い通信が特徴であるため、指向性ビーム生成法、指向性ビームのトラッキング等が課題である。

特に自動車の走行制御などが従来のベストエフォート型通信に対して、超低遅延と超信頼性の両立・バランスや、新しい発想に基づく時間制御型通信を検討する必要がある。

想定される実現時期と要件等：

- ～2022 年 スループット 20Mbps～1Gbps（V2V/V2I）、遅延 < 10msec¹
- ～2025 年 スループット 10Gbps クラス、遅延 < 1 msec、ベストエフォート型

¹ IEEE 802.11bd の目標（PAR）に相当 [8]

- ～2030年 スループット 100Gbps–1Tbps クラス、遅延 <0.1 msec、信頼性・時間制御型

(イ) 車車間・路車間通信のための自動車ネットワーク構築技術

低遅延通信を実現するためには、車車間・路車間の直接通信が有効であるが、①特に DSRC や LTE-V2X (PC5, mode4) による車車間通信では各車両が自律的に送信するため、干渉に起因して所要の通信品質（誤り率）が実現できない可能性がある。このため、a.可能な時はネットワーク・インフラを介したリソース割り当てを行う、b.マスター車両を決めて、マスター車両がリソース制御を行う、c.完全に自律的にリソース制御を行うなど、車車間・路車間通信における無線資源制御技術が必要である。交差点など固定した場所においては、設置したアクセスポイント（基地局）からの制御が有効であると想定される。

想定される実現時期と要件等：

- ～2025年 車車間・路車間通信における無線資源制御

(ウ) ヘテロジニアス自動車通信システム技術

V2V から V2N まで多様な通信需要を満たすためには、DSRC やセルラーV2X などの複数の通信規格を組み合わせる技術が必要である。広域の V2N 通信についてはセルラーV2X が担っていくと考えられるが、狭域向けの通信システムとの役割分担や通信トラフィックのオフローディングなどの連携が必要である。狭域向け V2V/V2I 通信については DSRC とセルラーV2X のどちらが担っていくのか不透明であり、この領域はしばらく複数のシステムの共存や補完的な使用も考えられる。また、自動車向け通信機器の普及や更新に対して通信技術の技術革新が速いため、後方互換性を確保して新旧の通信規格を共用したり、運用を停止せずに通信規格をアップデートしたりする必要がある。このような通信システムの過渡期や継続的なアップデートの間も十分な信頼性と可用性を確保する必要がある。セルラー系システムにおける V2I 通信などでは複数の事業者のネットワークをまたいだ通信が発生する可能性がある。公共性の高いサービスについては通信事業者によらず利用できる必要がある。通信事業者間の相互接続・連携の問題を解決する必要がある。長期的には、車両が高密度で存在する環境下での安定した広帯域通信、エンドツーエンドでの信頼性・時間制御、機械学習・AI 技術等にネットワークの自律制御が重要である。

想定される実現時期と要件：

- ～2030年 100Gbps–1Tbps クラス、遅延 <0.1 msec、信頼性・時間制御型、自律制御

(エ) 分散型無線環境情報データベース構築利用技術

高信頼な無線コネクティビティを確保できるようにするために、5Gをはじめとして多様な無線システムについて時間・場所ごとの電波環境情報を分散データベース化し、それを利用してリアルタイムに通信手段を変更・制御可能とする技術。周波数資源の利用状況を把握するセンシング技術、センシング情報から利用状況を時間的空間的に補間・予測する技術、リアルタイムに蓄積・処理するための時空間分散データベースを構築する。送受信位置における無線周波数資源の利用情報を集約・活用することで、チャンネル制御や干渉回避による信頼度保証、周波数共用などを行えるようにする。無線環境情報のデータベースは、モビリティのためだけでなく、あらゆる無線通信で有効に使える汎用的な技術である。自動車向けにはダイナミックマップなどで活用し、上位レイヤのセンシング情報も合わせてV2X向け分散データベースを構築する。標準化等を通じて海外と歩調を合わせた活動とすることが重要である。

想定される実現時期と要件：

- ～2030年 無線環境情報センシング、補間・予測の基礎技術の確立、DB構築運用技術、利用技術

(オ) 協調走行支援のための最適分散処理技術

安全運転支援や協調走行支援に必要な、周囲の車両の情報や歩行者等を含む交通情報、周辺環境のセンシング情報を、処理、予測、共有するための、通信手段の確保や、クラウドでの処理かユーザ端末の近くに配置されるエッジ・サーバでのオフロード処理かを、遅延時間やデッドラインを考慮しつつ総合的に判断して、最適な通信と情報処理を実現する分散処理技術。特にエッジ・サーバへの機械学習・AI技術など導入によるエッジの高機能化により、自動車のみならず、大量のIoTデバイスからの情報の処理を高度化・低遅延化することが期待できる。

想定される実現時期と要件：

- ～2030年 クラウド・エッジ最適分散処理、機械学習・AI技術など導入によるエッジ高度化

⑥-2 コネクテッドモビリティ技術

陸・海・空・宇宙の各領域で無線通信による高度なコネクティビティの展開により、人やモノの移動や輸送に係るあらゆるインフラやシステムの連携が可能となり、全体として新しいモビリティサービスの実用化が期待される。ここでは、自動車のモビリティ、個人のモビリティなど自動化・高度化に関する技術を取り上げる。

(ア) 路車間・車車間通信の融合による一般道完全自動運転の実現技術

車載センシングデバイス、路車、車車通信、GNSS等の測位インフラを融合して、悪天候でも完全自動運転が実現できる通信によるセンサー情報フュージョン技術。これまでのところ、自動運転は世界的にはIT企業や自動車メーカーが主導する車の自律型が主体だが、悪天候などの条件の厳しい場合や、自転車や歩行者が存在し様々な事象が発生する一般道においてはインフラ協調が必須となると考えられる。車載センサー（ローカルセンサー）や路側センサーの情報のV2V/V2I通信による情報交換で実現する周辺環境認識技術（collective perception）やそれに基づく協調走行のためのプロトコルや通信制御などが考えられる。

想定される実現時期と要件：

- ~2030年 車車・路車協調による周辺環境認識、協調走行制御

(イ) 地域オンデマンド交通の実現と最適化

自動運転やライドシェアを用いてラストワンマイルの交通手段を確保するとともに、公共交通などと合わせてマルチモーダルな移動をアレンジして提供する技術。高齢者などが交通困難者ならないように対策しつつ、地域の交通を需要に合わせて移動を最適化する。モビリティのセンシングとモデル化、交通事業者間のデータ連携と横断的な検索、サービス統合技術、都市交通の計画・最適化技術、省エネルギー技術などとともに、ビジネスモデルや法制度の検討が必要である。

想定される実現時期と要件：

- ~2030年 地域オンデマンド交通の実現
- ~2040年 サービス統合、都市や地域の交通最適化、省エネルギー

以下も、スマートモビリティに関連する技術ではある。広範な技術を含まれるため、鍵となる技術を特定することが難しいため、ここでは項目だけあげる。

- 電気自動車・情報通信ネットワーク・エネルギーネットワークの統合によるスマートグリッド
- 信号制御を含む都市部交通管制
- ストレージ（宅配ボックス）まで考慮した物流把握、自動物流

⑥-3 高度化 ITS 技術

自動車交通やその他の交通を高度化するための要素技術について取り上げる。

(ア) 都市部・屋内におけるセンチメートル級測位技術

自動車および歩行者の場所によらないセンチメートル精度での測位技術。現在は、GPS等のGNSSの利用に大きく依存した測位技術が中心であり、特に高いビル等が林立する都市部ではマルチパスの影響が大きく、高精度な測位ができない場所も存在する。準天頂衛星を使って位置精度を大きく改善できる場所がある一方で、高架橋下やアンダーパスなどそもそも衛星が捕捉できない場所も残る。特に歩行者の測位精度が飛躍的に向上すると、歩行者事故の大幅な削減はもとより、携帯端末向けの新たな様々なアプリケーションの展開が期待できる。歩行者については屋内における低コストで高精度な測位も課題である。関連して衛星測位システムのセキュリティ、車載用レーダーの高精度化などの課題もある。

想定される実現時期と要件：

- ～2025年 都市部におけるサブメートル級測位
- ～2030年 都市部・屋内におけるセンチメートル級測位

(イ) レーダー・通信融合技術

周辺の特定の自動運転車両との間で意思疎通を行うために、レーダーにより検知された車両と無線通信の相手を一致させて通信する技術。自動運転では、異なるAIで制御される車両同士が混在するため、互いの意思疎通がうまくいかないと事故につながる可能性があるため、通信相手と実車両とが一致することが重要である。センサーフュージョンより実現する方法もあるが、より簡便で確実な方法が望ましい。

想定される実現時期と要件：

- ～2030年 レーダー（センシング）と通信の融合

⑥-4 大容量リアルタイムデータ伝送技術

(ア) リアルタイム移動体情報プラットフォーム技術

自動車、二輪車、自転車、歩行者、鉄道車両、バスなどの都市空間におけるあらゆる移動体のリアルタイム位置、走行情報やセンシング情報、各種交通機関などからの情報を収集し、時空間情報として活用するための共通プラットフォーム技術。都市レベルの交通制御やMaaSの実現に貢献する。自動運転のために自動車センシング情報は、質、量ともに飛躍的に増大すると予想される。さらに人や物品など自動車以外の移動体のネットワーク化やトラッキングが進む。モビリティの解析や新たなサービス創出のためには、このような移動体からのセンシング情報を収集し、大規模な時空間情報として集積し、機械学習・AI技術による処理を可能とする情報プラットフォームが必要である。

車両などからの情報についてはメッセージフォーマットやプロトコルの策定、データ品

質を制御する機構、匿名化などのプライバシー保護技術などが重要である。また、広域にまたがる情報収集となるため、情報の流通経路が複雑になる可能性がある。収集した情報の信頼性や質（粒度）を確保する流通機構も必要である。これらの仕組みを支える大規模分散処理基盤も必要である。

想定される実現時期と要件：

- ～2035年 都市レベルでの移動体情報の共通プラットフォーム

5.3.3 将来必要となる技術の世界の動向と日本のプレゼンス

①-1 次世代車車間・路車間通信技術（DSRC、セルラーV2X、ミリ波・テラヘルツ波自動車通信）

DSRC については、米国と欧州では 5.9GHz 帯を用いる IEEE 802.11p（2012 年策定）を基盤として、各種応用に向けた IEEE 1609 シリーズなど上位層規格も合わせて策定されており、実証実験等で広くテストされている。802.11p の後継として、センシング情報の共有、自動運転支援、いわゆる空飛ぶ自動車などの新しいユースケースを想定して IEEE 802.11bd [8] の策定が開始されている。一方、セルラーV2X については LTE V2X は 3GPP Release 14 で策定され、5G 技術による NR-V2X の策定も進められている（2020 年に 3 GPP Release 16 にて策定見込み）。

日本においては 5.8GHz 帯の狭域通信システム（ARB-STD-T75）や 700 MHz 帯高度道路交通システム（ARB-STD-T109）が規格化されている。STD-T75 については ETC で広く実用に供されており、T109 についても市販車への搭載が始まっている。このように、日本は DSRC の実用化において諸外国に先行しており、この分野において大きなプレゼンスがある。また、自動運転における通信の利用については、DSRC、セルラー系の両方について検討、実証実験を進めており [9] [10]、この分野を世界と協調してリードできる立場にある。

自動車向け通信の広帯域化を目的として、ミリ波帯通信、テラヘルツ波通信、可視光通信も注目されている。IEEE 802.11ay（2020 年策定予定） [11]では、60GHz 帯において 20Gbps 以上（MAC レベル最大スループット）の通信を目指しているが、移動については歩行速度程度までを対象としている。日本においても、OAM 多重伝送による広帯域通信、ミリ波帯を利用した移動体高速バックホール、テラヘルツ帯デバイス、可視光通信の研究開発が進められている。自動車通信への応用は大きなブレークスルーとして期待できる。

①-2 車車間・路車間通信のための自動車ネットワーク構築技術

将来の自動運転や協調走行の通信支援では、交差点などのスポットでの通信のみなら

ず、継続的かつ信頼性がある車車間通信を提供する必要がある。このため、走行経路で様々に変化する無線環境を考えると、従来の端末主導の自律制御による無線資源選択では限界があり、車車間通信も含めた動的な無線資源割り当てなどのネットワーク制御が必要である。

DSRC は基地局等による周波数割り当て、チャネル予約機構、厳密な QoS 保証、積極的なネットワーク制御の機構を有していない。一方、セルラーV2X (LTE V2X) の狭域通信 (V2V/V2I/V2P 通信) では、基地局による無線資源割り当てがあるモード (mode 3) と、ユーザ端末が自律的に無線資源を選択するモード (mode 4) があり、V2V と V2I が混在するようなケースにおける制御について、検討する必要がある。

日本は独自の DSRC を策定し、特に路車間システムにおいて実用化・運用してきた経験があり、技術力とプレゼンスがある。また、周波数資源の管理に係る研究開発実績も豊富であることから、この分野をリードできるポテンシャルがある。

①-3 ヘテロジニアス自動車通信システム技術

自動車向け通信方式は用途に応じて様々存在するがその統合については課題である。狭域向け V2V/V2I 通信については DSRC とセルラーV2X のどちらが担っていくのか不透明であり、複数のシステムの共存や補完的に使用される可能性もある。都市部の渋滞などでの車両過密状態、高架橋や立体交差、トンネル、地下などを含む多様な走行環境、他システムからの干渉などの厳しい通信環境を考えると、DSRC とセルラーV2X などの異種通信システムの間で、あるいは V2V/V2I/V2N の間などで、互いに補完的に通信することが考えられる。ITU-T における将来の自動車マルチメディア通信のユースケースと要求条件の検討 [12] では、複数のネットワークの定性的な特徴やそれらを用いたコネクティビティの維持について議論されている。

本技術に関して日本に特段の優位性はないと思われるが、ネットワーク管理や運用技術の研究開発の実績があり、5G や自動運転などの実証実験も進められていることから、世界と協調して本技術の研究開発を進めることができると考えられる。

エンドツーエンドでの遅延時間制御、機械学習・AI 技術等にネットワークの自律制御に関しては新しい課題であり、世界の技術トレンドを見ながら積極的に取り組む必要がある。

①-4 分散型無線環境情報データベース構築利用技術

ホワイトスペースの利活用の中で検討され、TV ホワイトスペースを対象とした電波利用データベースが運用されている。テレビ放送用の電波資源が対象であるため地理的・時間的な粒度が荒く、自動車通信向けとは異なる。同様のデータベースの他の無線システムへの展開はあまり例がなく、この技術の研究開発は、一旦、落ち着いていると考えられる。

国内においては、今後増加が予想される膨大な数の IoT 無線機器からの電波干渉への対策を目的として、電波環境の測定・分析や電波伝搬モデル構築、電波環境モニタリング技術などの研究開発の実績がある。自動車通信に関する無線環境のセンシングやデータベース化は新しい課題である。干渉回避や自動車通信の高度な制御、さらには、ダイナミックに無線資源を時間的・空間的に共用するシステムの実現も期待でき、日本の技術力の強化につながると考えられる。

①-5 協調走行支援のための最適分散処理技術

自動車、エッジ、クラウドとの連携はコネクテッドカーの新しいサービスの基盤技術である。自動車に限らず、幅広いユースケースが対象となる技術である。5G においてはモバイル・エッジコンピューティングが導入される見込みである。さらに近傍車両の間で計算資源を共有するフォグコンピューティングも提唱されている。

特にアカデミアにおいて、遅延制約やコスト制約を満たすユーザ端末・エッジ・クラウド間のタスクオフローディングなどの最適な分散処理技術の研究開発が活発になっている。

標準化については、欧州 ETSI がマルチアクセス・エッジコンピューティング (Multi-access Edge Computing; MEC) に積極的に取り組んでいる。ETSI MEC は、5G を含む様々なアクセスネットワークに適用することを仮定して、映像解析、IoT、ヘルスケア・サービスなど幅広いユースケースを対象としている。V2X アプリケーションに関しても、ユースケースを収集・分析し、MEC サービスや機能に対する要求条件をまとめている [13]。

日本では、5G に関連した実証実験などを通じて研究開発や検証が進められており、比較的高い技術レベルにあると言える。重要な技術であり、積極的に取り組むことで日本の技術力の強化につながることが重要である。

②-1 路車間・車車間通信の融合による一般道完全自動運転の実現技術

各国とも SAE レベル 4 高度運転自動化に向けた研究開発を進めている段階である。まずは高速道路などの条件を限定しやすい状況での自動運転の実用化が先行しているが、都市部一般道でのユースケースについても要素技術の高度化やシステム技術の検討が進むものとみられる。

日本では、DSRC として ARIB-STD-T109 などが規格化されており、実用化されている。通信を用いた安全運転支援の研究開発は先進安全自動車 (ASV) や安全運転支援システム (DSSS) などの研究開発や実用化で実績がある。また、VICS による路車間通信を用いた走行支援など路車間協調についても実用化されている。これらの実績を自動運転支援につなげることが重要である。

近傍の自動車や歩行者の検知は、通信によるセンシング情報の交換にもとづく周辺環境

認識技術に発展しつつあり、これらの成果を取り込んでいくことが重要である。ダイナミックマップ、準天頂衛星を用いた雪道での自動走行などは、インフラ協調でしか実現できない例であり、日本が主導しており、それをさらに高めれば世界が注目する技術となりえる。

都市部の公道における実証実験はまだ例が少ないものの、例えば、タクシーの自動運転や自動運転バスの実証実験などが実施、計画されており、今後、さらに本格化するものとみられる。これらの成果を世界発信していくことも重要である。

②-2 地域オンデマンド交通の実現と最適化

自動運転の実用化を睨んで世界的に多くの実証実験が行われている。日本においても自動運転を利用したラストワンマイルや中山間地など交通困難地域や、交通困難者への対応を目指した実証実験が積極的に行われている。実証実験からの知見は、地域の交通問題の改善に加えて、自動運転の技術、実用化、運用に対しても貢献すると考えられる。

一方で、地域全体の交通の改善には、モビリティのセンシングとモデル化、交通事業者間のデータ連携と横断的な検索、サービス統合技術などの技術的な開発が必要であり、さらには、都市交通の計画・最適化技術、省エネルギー対策など、今後の研究開発によるところが大きく、世界的にも挑戦的な課題である。

③-1 都市部・屋内におけるセンチメートル級測位技術

衛星測位システムは重要な社会基盤となっており、米国の GPS、ロシアの GLONASS、欧州の Galileo、中国の北斗（BeiDou）等、各国とも衛星測位システムの整備を進めている。日本は準天頂衛星システム（QZSS）を、2018 年から 4 機構成で運用しており、2023 年から 7 機構成とすることを予定している。GPS を補完して安定した測位を実現する衛星測位サービスとともに、サブメートル級・センチメートル級測位補強サービス（CLAS）を提供している。また、アジア・オセアニア地域でも利用できるセンチメートル級位置補強技術 MADOCA の実証実験も開始している。このような高精度の測位を一般に提供している例は少なく、世界的にも先駆的な取り組みである。

一方で、そもそも衛星測位システムが不得手とする状況も存在し、他の測位技術との補完などにより常に高精度の測位サービスを実現する必要がある。特に屋内も含めた低コストの歩行者向けのセンチメートル級測位技術は確立しておらず、このような技術の研究開発により、日本の測位技術の優位性を高めると考えられる。

③-2 レーダー・通信融合技術

現在策定中の IEEE 802.11ay では 60GHz 帯にてデータ用途に加えて、データフレームのプリアンプルの一部を利用してレーダーとしても使用することが検討されている。スマートデバイスのためのジェスチャー認識、健康や見守り、個人認証、自動車内のモニタな

どのユースケースを想定している。IEEE 802.11bd (NGV) では V2X 通信と共に動作するポジショニング手順を規格に含めることを目標 [8] としており、検討が始まっている。

国内においては、学術研究などでミリ波通信、スペクトラム拡散通信、可視光通信を利用した車車間通信と測距の統合に議論があったものの、実用化には至っていない。

検討の初期段階にあり、世界と日本の間で特段の技術差は認められない。

④-1 リアルタイム移動体情報プラットフォーム技術

自動車からの交通情報については公共・民間セクタとも、それぞれの目的に応じて情報の集積を開始している。いわゆる巨大プラットフォームの他に、世界規模で交通情報を収集して分析・提供する民間企業が現れており²、競争が激化している。

日本では、ETC 2.0 や自動車メーカーの提供するテレマティクスサービス等で自動車プローブ情報が収集・活用されている。これまで、このような情報については、組織に閉じて管理・利用されており、業種をまたいだ利用ができる状態になかったが、データのオープン化やデータ連携の機運が高まっている。また、自動運転に向けてこれまでより高精度な地図情報と交通情報を提供する機構であるダイナミックマップの整備も進められている。ダイナミックマップでは車線単位での交通情報の提供を可能にするもので、国際的にも高い競争力がある技術と言える。

今後、自動車からのセンシング情報には映像等が含まれるようになり、格段にリッチなものとなると考えられる。さらに、将来のコネクテッドモビリティにおいては、自動車のみならず、人とモノに関するあらゆる移動を把握することが求められる。質、量ともこれまでとは桁違いの移動体情報をリアルタイムに活用するためには、センシング技術、通信技術、情報処理技術、ビッグデータ解析技術、機械学習や AI 技術など多様な技術が必要であり、この技術分野での国際競争力を維持する上でも重要である。

5.6.4 国が取り組むべき技術項目

日本の技術的な優位性やプレゼンス、国際的な協調やリーダーシップ、今後の学術や技術に対する重要性を考慮すると、以下の技術項目について、国が業界や学会と一緒に取り組むことが期待される。

①-1 次世代車車間・路車間通信技術

(DSRC、セルラーV2X、ミリ波・テラヘルツ波自動車通信)

①-3 ヘテロジニアス自動車通信システム技術

(エンドツーエンド信頼性・時間制御、機械学習・AI 技術等によるネットワーク自律制御)

² 例えば、TomTom (オランダ)、Here Technologies (オランダ) などがある。

- ①-4 分散型無線環境情報データベース構築利用技術
(無線環境情報センシング、補間・予測の基礎技術の確立、DB 構築運用技術、利用技術)
 - ①-5 協調走行支援のための最適分散処理技術
(クラウド・エッジ最適分散処理、機械学習・AI 技術等によるエッジ高度化)
 - ②-1 路車間・車車間通信の融合による一般道完全自動運転の実現技術
(周辺環境認識、協調走行制御)
 - ②-2 地域オンデマンド交通の実現と最適化
(サービス統合、都市や地域の交通最適化、省エネルギー)
 - ③-1 都市部・屋内におけるセンチメートル級測位技術
 - ④-1 リアルタイム移動体情報プラットフォーム技術
-

参考文献

- [1] MaaS Alliance , “White Paper Guidelines & Recommendations to create the foundations for a thriving MaaS Ecosystem”, Sept. 2017.
- [2] ITU-T Focus Group on Technologies for Network 2030 (FG NET-2030), “Network 2030 A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond,” May 2019.
- [3] ITU-T Focus Group on Technologies for Network 2030 (FG NET-2030), “FG NET-2030 Sub-G2 New Services and Capabilities for Network 2030: Description, Technical Gap and Performance Target Analysis,” Oct. 2019.
- [4] Matti Latva-aho, Kari Leppänen (eds.), “6G Research Visions 1 Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence,” 6G Flagship, University of Oulu, Sept. 2019.
- [5] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議, “官民 ITS 構想・ロードマップ 2019,” 2019 年 6 月.
- [6] 一般社団法人自動車研究所 ITS 産業動向調査研究会, “ITS 産業動向に関する調査研究報告書 -ITS 産業の最前線と市場予測 2019 -,” 2019 年 10 月.
- [7] Jana Sochor, Hans Arby, I.C. MariAnne Karlsson, Steven Sarasini,, “A topological approach to Mobility as a Service: A proposed tool for understanding requirements and effects, and for aiding the integration of societal goals,” Research in Transportation Business & Management,

Volume 27, Pages 3-14, 2018.

- [8] IEEE, “802.11 NGV proposed PAR,,” Study Group on 802.11bd (TGbd), 802.11-18/0861r9, Sept. 2018.
- [9] ITS 情報通信システム推進会議セルラーシステム TG, “セルラー通信技術を用いた ITS・自動運転の高度化に向けた課題調査報告書,” 2019 年 6 月.
- [10] ITS 情報通信システム推進会議, “自動運転(自専道)通信活用ユースケース向け通信システムの実験用ガイドライン,” ITS FORUM RC-015, 2019 年 10 月.
- [11] IEEE, “802.11 NG60 SG Proposed PAR,” IEEE 801.11-14/1151r8, Mar. 2015.
- [12] ITU-T Focus Group on Vehicular Multimedia FG-VM), “Use cases and requirements for the vehicular multimedia networks,” FGVM-01R1, Dec. 2019.
- [13] ETSI Industry Specification Group (ISG) Multi-access Edge Computing (MEC), “Multi-access Edge Computing (MEC); Study on MEC Support for V2X Use Cases,” ETSI GR MEC 022 V2.1.1, Sept. 2018.

5.6.5 技術ロードマップ

将来システムと詳細技術の技術ロードマップを図 5.6.1 に表示する。

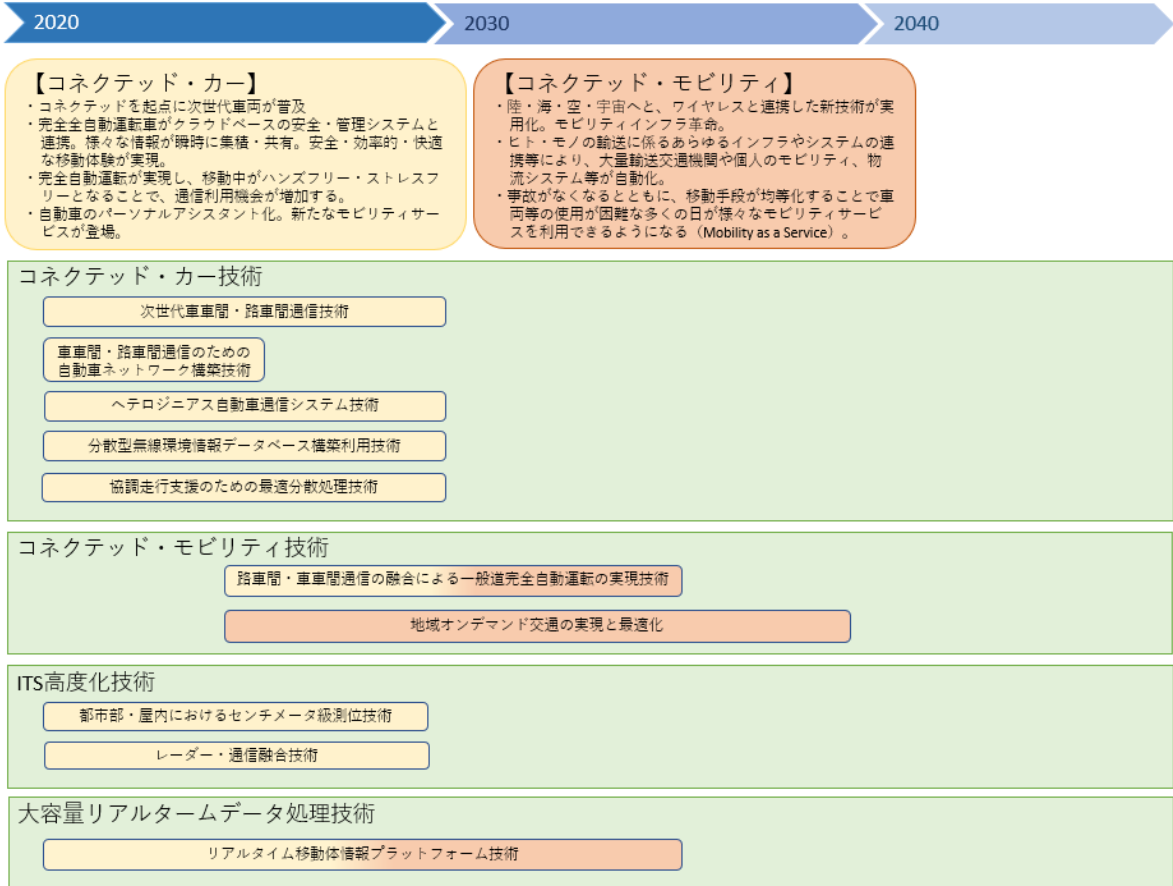


図 5.6.1 モビリティ分野の技術ロードマップ

5.6.6 将来システムのイメージ図

将来システムのイメージ図を図 5.6.2 に表示する。



H30年度版情報通信白書を基にサイバー創研にて作成

図 5.6.2 モビリティ分野の将来システムのイメージ図

5.7 セキュリティ分野

執筆：園田 道夫（情報通信研究機構 ナショナルサイバートレーニングセンター センター長）

執筆協力：高倉 弘喜（国立情報学研究所サイバーセキュリティ研究センター センター長 教授）

執筆協力：横山 浩之（国際電気通信基礎技術研究所 適応コミュニケーション研究所 所長）

5.7.1 ワイヤレスセキュリティの将来動向

コンピューターを用いた情報処理が日常的に深く浸透し、今や一人数台のネットワーク端末を持ち、家電やクルマもネットワークに接続されるようになった。コンピューターを単体で防御する仕組みを徹底していれば良かった時代は遠くなり、ネットワークの一部としてのコンピューター、そしてネットワークそのものを保護する仕組みが一層必要とされている。

一方ネットワークはさらなる高速化を求められ、インフラのベースが大々的に 5G となる時代がすぐそこに迫っている。またネットワークのセキュリティ基盤としての暗号の重要度はさらに増しているが、コンピューターはムーアの法則を遥かに越えて高速化し、量子コンピューターの実用化が近い将来にも見込まれるため、計算量で強度を測っていた暗号は根本的な考え方を変える必要すらある。

センサーとしても機能する IoT はこれまでは存在していなかった新たなネットワークを構成し、それに伴って新たに大量のデータが収集されるようになっていく。今後この流れはさらに進み、単位面積当たりのコンピューターの密度は加速的に増えていく。センシング、あるいは収集されるデータも今後さらに多様になり、金融取引や財産、医療情報など、秘匿必要性の高い情報が増えていくことは確実である。そしてそのネットワークを構成するのは保守の手間やコストなどを考えるなら有線のもののごく少なく、ほとんどがワイヤレスのインフラになると考えるのが自然だ。

しかしながらワイヤレスな技術におけるセキュリティは、未だ十分であるとは言えない状態である。

ワイヤード（有線）のネットワークでは、物理的に線を繋いで接続する、という参加（接続）へのハードルが存在する。有線の場合、ネットワークに参加するには接続口に物理的に接近する必要があるため、入退室管理などによって保護されていることになる。一方ワイヤレスの場合は電波を受信できれば良く、建物の壁を超えて接続することも可能となり、物理的なハードルは関係なくなってしまう。接続可否は認証に依存して判断しているが、認証の強度や鍵管理など、弱さとなり得る可能性を抱えてしまっているため、なりすましや盗聴、改ざんには十分に強いとはいえない。

また、ワイヤレスを IoT が連なるネットワークのインフラとして用いる場合、低コストが大前提となる端末（コンピューター）が多数接続することになる。低コストの開発では機能の実現が最優先となり、セキュリティの実装は後回しにされてしまう。低コストである IoT の場合、そもそも CPU の性能も高いとはいえ、メモリも少ないなど、コンピューターリソースも厳しいため、セキュリティの機能にリソースを割くことも避けられてし

まう可能性が高い。

いわゆる IoT より高性能なコンピューターを積載できるクルマなどの端末も、ワイヤレスネットワークへの依存度が増していくだろう。そうしたネットワークを考える場合、単にクルマ自体をセンサーとして情報を収集解析する仕組みを想定するだけではなく、渋滞解消や事故対応、自動運転制御などを目的とする交通管制システムとの連携も考慮する必要がある。それは逆に言えば、クルマとそれに連なるネットワークの安全性が交通管制システムの安全性に直結するということでもあり、クルマからワイヤレスネットワークを経由して交通管制システムに攻撃が到達する可能性がある、ということでもある。近年急激に普及してきた IoT とは違って社会で使われた長い歴史を持つクルマの場合、古いクルマが繋がることも前提とし、信頼性が低いものが繋がってもネットワーク自体が保護される仕組みにする必要がある。

さらに、IoT やクルマなどの端末=センサーが社会に多数実装されるようになると、大量のデータを収集できるようになる。今まで収集したことがないビッグデータの利活用によって、未解決の社会的課題が解決されることが望まれ、新たなビジネスの創出も期待される。そうしたビッグデータの解析には機械学習や深層学習など AI 関連技術が必須となるが、この分野は現在世界中で研究開発や社会実装が活発に行われている。そうした中今後問題になると思われるのはまず、データの汚染である。データの恣意的な汚染によって判断を任意の方向にねじ曲げることが可能となると、データの重要性によっては新たな社会的リスクとなり得てしまう。汚染手法もその防御手法とともに近年盛んに研究されているがまだ途上であり、どのような防御にどのような実装が必要となるかさえもわかっていない状況だが、今後データの収集から管理、保護というところがそのインフラであるワイヤレスのセキュリティとともに課題となるだろう。

繋がるものが例えば衛星などの場合も想定されるリスクは同様のものになるだろう。将来は電力伝送に用いられることも期待されているが、その場合も同じく、ネットワークそのものの保護やしつかりとした認証の仕組みが必要になる。電力の場合はデジタルデータのやり取りと異なり、物理的な安全性に直結する。ネットワークを擾乱されてしまうと物理的な発火や感電などに繋がる恐れがあるため、データの送受信以上に安全機構は厳重に設計実装する必要がある。

ワイヤレスなネットワークの利点は有線接続のような設備投資が不要であり、有線接続よりも物理的な制約から遥かに自由だということにあるが、その利点によって今後あらゆるところにセンサーが配置されていくだろう。それは家庭や学校、オフィスといったところから、さまざまなサービスを物理的な距離にかかわらず享受できるということに繋がる。実験的運用が始まっている医療分野やそれに関わるサービス、工場の制御など工業分野での応用、農業分野でのセンシングと分析、エネルギー分野の分散化への適用、高齢化社会を支えるであろう見守りサービスのなものなど、可能性は多数ある。それらを支えるワイヤレスなネットワークのセキュリティは、社会的な重要さがますます増大していか

ろう。

5.7.2 将来必要となる技術

前述の通り入退室管理等の物理のハードルが存在しないため、ワイヤレスネットワークの場合は接続する端末、コンピューターの認証の仕組みが重要となる。現状実現、実装されている技術から考えると、認証の仕組みは暗号技術が今後も担っていく可能性が高い。したがって盗聴や改ざんに強い暗号技術の開発、あるいは暗号技術自体の危殆化を想定した対策技術の開発が必要であり、例えばブロックチェーンなどのようにオープンでありつつもデータ改ざんや不正操作への耐性が強いセキュリティ技術や、秘密計算のように情報へのアクセスポリシーを暗号ベースで実装可能な技術の開発・実装が必要になるだろう。また、IoTなど計算リソースが乏しいコンピューターが形成するネットワークにおいても実用できる軽量暗号も現在盛んに研究開発が進められているが、こうした実装も耐量子技術と同様に必要となる。

また、ソフトウェアによる認証は結局のところパスワードという仕組みが抱える弱点に縛られてしまう。暗号領域の鍵交換の仕組みはそれに対するひとつの解ではあるが、スマートキーのリレーアタックや、あるいはリプレイアタックのような攻撃を想定するなら、ソフトウェアをベースにした対策だけでなく、ハードウェアやその特性を認証に用いる対策、例えばレスポンス応答を用いた物理的なレイヤでの認証などの対策も必要になるだろう。これらの技術は数年前より研究されており、実装も存在する。今後は本格的な実装およびその社会的な展開が望まれる。同様にハードウェアを用いた認証というものも、センサーの機器自体の保護と併せて研究開発が必要となるだろう。

さらに、認証と同様の仕組みになるのかどうか、勝手に怪しい通信などを行わせない、サプライチェーンリスクを水際で止めるような、いわゆるスパイ行為を行う部品が入り込まないようにする必要もある。部品を検証するのか、部品の動作状況を見て怪しい動きを検知するのか、紛れ込んでしまった場合のリスクを考慮した対策が必要になるだろう。

また、特にIoTなどのようにコストをかけられない中で各端末のセキュリティを担保できる仕組みが何らか必要となる。製品認証や標準化などの動きはあるものの、技術的に解決する方法はまだ確立されていない。例えば端末が完全に占拠されても全体に影響がないようにする技術、あるいは端末がそれぞれ自動的に脆弱性を発見し、自動的に穴埋めする技術、自動的にアップデートする技術などが必要となるだろう。すでに2016年に米国で脆弱性自動探索の実装コンテスト（Cyber Grand Challenge）が開催されてパフォーマンスを競ったが、そうした技術は近い将来に基本的な機能としてOS等にも実装されていくだろう。要素技術はすでに研究開発されているものもあり、近い将来の本格的な展開が望まれる。

脆弱性探索の技術および実装は、実装コンテストが米国内で閉じられたものとして開催されたこともあって、開発ノウハウも基本的には米国内に閉じられている。ツールそのもの

のは Git 等で公開されていて、情報通信研究機構（NICT）が主催する SecHack365 という若手人材育成事業において公開されているツールの一部の改良を行った実績があるが、同様な形でソースコードレベルで読解することでノウハウを吸収し自らのものとする事は可能だろう。とはいえ、1 からアイデアを出して開発し、さらにそれを工夫してきた技術者たちと、その成果を享受する（読む）だけの技術者たちとは試行錯誤数含む経験値が大きく違う。現在その点ではアメリカとそれ以外の国々とは大きな差があり、同等レベルたり得ているエンジニアはアメリカ以外ではごく少数である。

バグの探索も自動化が進んでいる。すでに開発環境でのテストは、CI/CD

（Continuous Integration／Continuous Delivery＝継続的インテグレーション／継続的デリバリー）のような社会的要請の流れに沿ってある程度まとまった単位で行う形から各工程に細分化されて溶け込むように行う形に変わりつつあり、ソースコードの自動解析ツールなどもこれまでの外国製ツールに対抗するように、日本発でも意欲的なツールやサービスが出現し始めている。ただ、開発に用いられるプログラミング言語は多様で、その前提でのバグの捕捉というのは非常に難しい分野であり、すでに出ているツールのバグ捕捉率（カバレッジ）も人間の手間を減らすには役立つものの、ICT 人材の世界的な不足が顕著な現状を考えるならまだまだ改良されるべきであろう。機械学習や深層学習などの AI 関連技術のその分野への応用も始まったばかりで、十分な結果が出ているとは言いがたい。プログラミング言語自体の改良も進み、新たな考え方に基づく言語が多く開発されているが、それでもまだバグや脆弱性は無くならない。仕様にバグや脆弱性を作り込まないようにするための試みもさまざまにされているが、広く現場に浸透するほどにはなっていない。そもそもバグや脆弱性を生まない、生みにくい言語というものも必要だろう。日本発の開発言語というと Ruby が有名だが、それ以外のものはゼロでは無いが極めて存在感に乏しい。

対データ汚染という観点では、汚染を予防・検出する技術や、汚染に耐えうるアルゴリズムの開発が望まれる。さらに、それらを検証するための技術と、暗号分野における暗号の解析技術のようにそれらを用いて王道的な検証手順を確立する必要がある。まだこの分野の研究は、例えば深層学習を用いた画像認識に対し敵対的サンプルを作る研究などが盛んに行われているが、強度や精度を担保する解析手順の標準化というところは端緒にも着いていない。逆に言えばこの分野で日本が活躍する余地は十分にあると考えられるが、世界各国、あるいは GAF A やアリババなどの超巨大企業の AI 関連の研究予算を見ると、その余地が存在するのもわずかな間でしかないと思われる。

5.7.3 将来必要となる技術の世界の動向と日本のプレゼンス

まず暗号は長い研究開発の歴史の中で一定の存在感を出し続けている。世界のトップクラスとのパイプも太く、研究者レベルでは活発なコミュニケーションがある。国内の研究開発の環境も悪くはない。

しかし、暗号は本格的に量子コンピューターを前提とする耐量子時代となるため、これまで同様以上の存在感を保つためには研究開発にしろ検証にしろ高性能なコンピューターの存在が欠かせない。今後科学技術はすべての分野に等しく、世界トップの研究力開発力のためには高性能なコンピューターと、それを使いこなすためのソフトウェアが大前提となるだろう。稼働を終えたスーパーコンピューター京やその後継が存在し続ける限り、トップクラスに居続けることは可能だろう。併せてスーパーコンピューターを使いこなせる人材の育成と確保が重要になってくる。日本は研究者を取り巻く環境は良いものとは言えず、論文数も減り続けている。ハードウェアやソフトウェアを揃えても、それを使うべき人が研究費確保のための膨大な雑務に追われているようでは、レベルを保持することは難しい。

ソフトウェアの開発に関わる環境についても、世界的な人材不足は日本も免れていないが、技術者同士で繋がるコミュニティが多数存在するという強みはある。一方、世界的に広まるような開発ツール、開発言語がどれだけあるかという現時点で名を挙げられるのは Ruby くらいで心許ない。しかし、言語開発については日本には活発に活動するコミュニティも存在し、一定数のコアなファンが居るのでポテンシャルはある。そういうところに働きかければ、バグや脆弱性が生まれにくい言語を開発してもらうことは可能だろう。個人の感覚に頼るだけでなく、学会の知恵を援用しながらそういう言語や開発環境の開発を行うというのは国がやる意義があるのではないだろうか。

例えば暗号や、それこそ本レポートのメインテーマであるワイヤレスの研究のようにコミュニティというよりはもっと大きなグループになっていて、世界的にもパワーを発揮できている分野もある。しかし、陣容も学会活動も、開発からビジネスへの流れも、そして研究費もそれほど割けない、実験的な要素が多く含む分野、例えばプログラミングやシステムの分野では、それこそ国ベースでその活動を支援していく必要があるのではないだろうか。

AI や量子の分野において日本に強みがあるかという点、世界トップからは研究費の額だけを見ても大きく遅れを取っている。この分野はまだまだ多くの研究すべきテーマがあり、研究者の環境が今より整備されれば巻き返して追従していくことはまだ可能だろう。ただ、前述したように時間の猶予は少ない。

5.7.4 国が取り組むべき技術項目

ワイヤレスネットワークやそれに連なる大量の IoT やクルマ等の端末を活用するには、バグや脆弱性が無い（少ない）良質なソフトウェアが必須である。そのために必要なことはまずは良質なソフトウェアを生み出すことができるエンジニアの育成であろう。

プログラミング教育が学校に導入されるが、これによってプログラミングに目覚める人材は確実に増えるはずだ。プログラミング教育に関しては教育コンテンツ不足や教員不足、教員のスキル不足などが指摘されているが、仮に教師の頭数は揃えることができて

スキル不足、コンテンツ不足は中々解消できないだろう。特に「セキュアなコードを書く」ことをテーマとしたコンテンツはとて少なく、世界的に見ても書籍が数冊程度あるくらいである。こうしたコンテンツは自然発生的に出現を待つしかないのが現状だが、Webアプリケーションのセキュリティに関する情報処理推進機構（IPA）の取組のように主導的に国およびその外郭組織がコンテンツを作成しても良いのではないか。そして、そのコンテンツを用いて学生生徒に教える教師を鍛えるためのコンテンツや、教師が継続的に最新の知見を獲得できるような体制の整備なども国が主導して行うと良いだろう。

そしてエンジニアの育成も重要だがエンジニアの手間を減らすツール等の環境整備も重要である。ツールが良ければプログラマーが持つべきセキュリティの知識は少なくなり、負荷は減る。教育は時間もかかるしコストもかかるため、開発環境や開発ツールのセキュリティ面でのサポート機能はさらなる充実が望まれる。このようなツールを国主導で開発した例は国内外ともほとんど無いが、業界の知見や学会の研究成果を結集して開発する意義は大きい。そしてそれは開発言語にも言える。新たなアイデアに基づくバグや脆弱性を生み出しにくい言語や、それを活用するためのフレームワークなどが必要で、それらを作るだけの知見はたまってきている。

IoT等のセンサーを用いて収集するデータに関わるセキュリティの重要な一部として、AI関連のデータやアルゴリズム、AIシステムそのものの保護は欠かせない。AIによるシステムを作り出すときも、開発されるAIを評価するシステムが必要だ。この分野の研究は敵対的サンプルなどまだ端緒に過ぎず、データ汚染や敵対的サンプルなどに耐えられるAIシステムを作り出すための研究は、少なくとも発表されているものは非常に少ない。AI関連技術の現実への適用は加速度的に進んでいるが、その精度や妥当性、そして脆弱性などを評価できるシステム、あるいはもっと抽象的に言うと「仕組み」が必要だろう。さらに、データが仮に汚染されていたとしても成果に影響が出ないアルゴリズムなどを研究開発する必要もあるだろう。この分野も国が業界や学会と一緒に取り組むべきところだ。

同時にAIに関しては、評価のベースにもなるデータセットの管理の仕組みが必要となる。恣意的操作などの汚染を入り込ませない管理の仕組み、品質を保つデータセット評価の仕組み、あるいはシステムが必要となるだろう。社会としてデータをどう保護するか、社会制度というところまで視野に入れた仕組みが必要になるだろう。データが汚染されたのかどうか、異質なデータを汚染と呼ぶのかどうかを判断する研究や、汚染を検知する研究、そういったものも世界的にあまり着手されていないところだが、AIを用いたシステムの堅牢性を保つためには必要となるだろう。

さらに、これは暗号分野とも共通するが、すでに現在もAIや暗号の研究においては膨大な計算機リソースが必須となってきている。国を代表する高性能なスーパーコンピューターだけでなく、研究者や開発者がカジュアルに利用できる計算機リソースの必要性は加速度的に高まりつつある。ハードウェアそのものの開発とともに、計算機リソースをカジュアルに活用できるような環境を整備することは研究開発力の国際的高レベルの維持にとっ

て非常に重要である。

また、電力などのエネルギー伝送の場合にはエネルギーの誤用、誤照射などに繋がらないような技術、暴発しない予防技術などが必要となる。あるいは干渉、盗電対策なども必要になってくるだろう。こうした技術の開発は重要インフラ事業者としての一組織にとどまらず、テストベッド等の環境整備を国主導で行うべきであろう。

5.7.5 技術ロードマップ

将来技術の動向と詳細技術の技術ロードマップを図 5.7.1 に示す。

セキュリティ技術は、本調査対象分野のシステム分野（①移動通信～⑥モビリティ）において、必要不可欠な技術となっている。しかしながら、個々のシステム分野に特化した技術ではなく、各分野に共通して必要になる技術が多いことから、上記 5.7.1 章から 5.7.4 章では、代表して「ワイヤレスセキュリティ技術」について述べてきた。ただし、本技術ロードマップでは、共通技術である「ワイヤレスセキュリティ技術の詳細技術」を、各システム分野に展開して表示している。

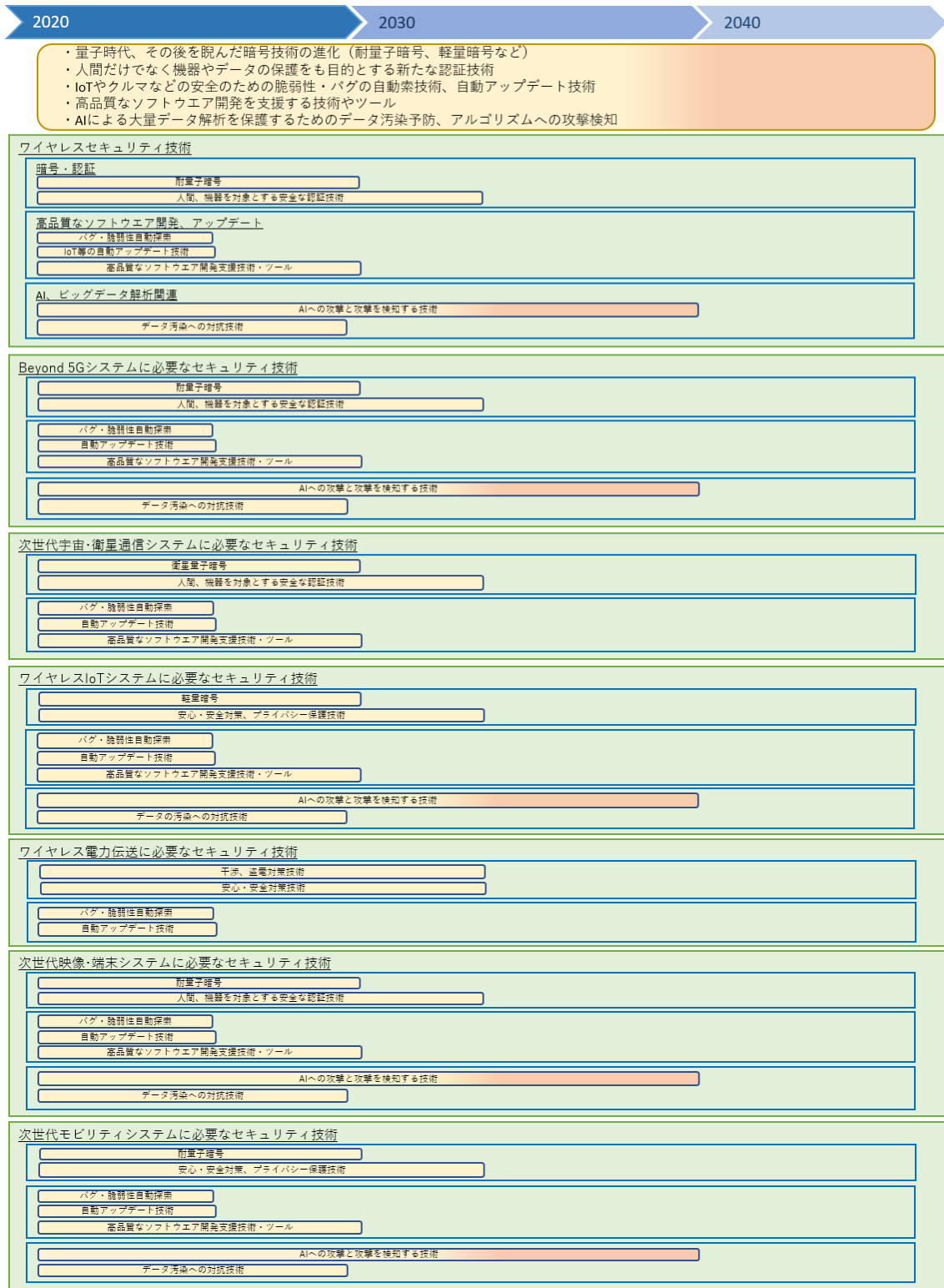


図 5.7.1 セキュリティ分野の技術ロードマップ

5.8 デバイス分野

執筆：古神 義則（宇都宮大学 工学部 基盤工学科 情報電子OP ティクコース 教授）

執筆協力：久保田 周治（芝浦工業大学 工学部 情報通信工学科 教授）

執筆協力：竇迫 巖（情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 所長）

5.8.1 将来動向

5.8.1.1 将来技術の展望

以前は、我が国のデバイス分野技術は、国際的に先端を進んでいたが、中国、台湾、韓国の台頭に押され、一般的に国際競争力が低下してきている現実を、先ず直視しなければならない。

一方で、今後 10 年、20 年の間に益々の発展が期待されるワイヤレス通信活用のシステム技術としては、次世代セルラーシステム、M2M、IoT、センサー及びセンサーネットワークなどがあげられるが、それ以外にも、パワーエレクトロニクスやスーパーコンピューターなどの他分野へのワイヤレス技術・通信技術の浸透による技術革新も期待されている。これらの根幹となる基盤技術として、デバイス分野技術は大変重要であり、同分野の国際競争から離脱し他国に完全に依存する状況は避けなければならない。

しかしながら、デバイス分野の技術レベルの維持には、巨額の投資が必要である。これまでの我が国におけるデバイス基盤技術の推進には、国内企業の貢献が大きかったが、当面の利益追求を重視せざるを得ない現状においては、企業もしくはその連合体だけで巨額の先行投資を継続していくことは難しい。

我が国の強みを活かせる技術分野にはさらに注力し、その他の分野についてもシステム応用を睨みながら、重要と思われる基盤技術を取捨選択し、技術レベルを維持する体制を、産官学の連携で形成するなど、国内の人材、資金を効率よく活用できるようにすることが必要と考える。

今回行った有識者へのヒアリング調査によると、デバイス分野の中で、比較的近い将来において特に重要と思われる技術分野は次の 5 項目に大別できる。先ず、①5G および Beyond 5G などの基幹無線通信システムや柔軟的な運用が期待されるコグニティブ無線システム用の無線通信用アナログデバイスの開発があげられる。次に、②電気自動車やドローンなどへのワイヤレス給電システム用の送電部用デバイス技術および受電部用整流デバイス技術の発展が急務である。特に後者は、エネルギーハーベスティング（電波環境発電）の実現にも寄与する重要な技術課題である。さらに、③ミリ波・準ミリ波活用のための高周波デバイス技術の推進、④デバイスの高機能化やアナデジ混在技術など、所謂「More Than Moore」のアプローチ展開、⑤数百 Gbps の高速光通信をもたらすシリコンフォトニクスシステムと 5G などワイヤレスシステムとのインターフェース技術の進展が必要であろう。以上は、すでに想定・計画されるシステム技術実現のためのニーズに応える技術展開である。

もう少し長いスパンで考え、挑戦的な技術課題ではあるが、いまから先行投資をしてお

くべき技術項目としては、⑥スーパーワイドバンドギャップデバイス技術、⑦新奇デバイス技術、⑧テラヘルツデバイス技術、などがヒアリング調査への意見としてあげられている。我が国から革新的な技術が発信されれば、それがシーズとなり、さらに進んだ日本発のワイヤレス通信システムの構想につながる可能性も出てくる。

5.8.1.2 将来技術のスペック

前述の近い将来向けの技術課題①～⑤についての技術スペックの中で特に重要と考えられる項目を、それぞれ以下に示す。

① 無線通信用アナログデバイス

5G 以降のセルラーシステム用デバイスに求められる技術要件として、特に重要であるのが広帯域化と高効率化である。5G 以降のシステムでは使用周波数帯が、UHF 帯、SHF 帯、さらには EHF 帯へと広がり、それぞれの周波数帯向けに、広帯域化と高効率化（バックオフ効率）を意識した電力増幅器技術が各国で進められているが、現状国内技術の海外に対する優位性は特に認められない。電力増幅器技術は無線技術の根幹であり、この点で海外に後れを取ると情報インフラの一番の基幹部分を、海外技術に依存することにもつながる危険性がある。

また、フィルタデバイスに関しても、電波天文や他無線システムとの干渉を防ぐために、減衰周波数帯に関するスペックが厳しく設定されている。基地局用フィルタには、低損失でかつ急峻で深い減衰特性が求められ、端末用フィルタにはさらに小型性と両立が必要となる。最近では、フィルタ技術に関しても、中国、韓国が研究力を増強していることが、関連学会に出席してみると強く感じるようになった。この分野においても国産技術の巻き返しが必要である。Massive MIMO やビームフォーミングアンテナ技術も、5G 以降のカギとなる技術であり、国産技術の健闘が認められるものの、より一層の優位性確保のために注力すべきである。アンテナシステム用の移相器、スイッチング素子などのデバイスにも、ミリ波周波数への対応、広帯域化、低損失化、小型化など一層の技術向上が必要である。

② ワイヤレス給電システム用デバイス

電気自動車等への大電力伝送を実現する受電用デバイスに、高耐圧で電力変換効率が高くかつ小型に構成できる整流器用デバイスの開発が必要である。ワイドバンドギャップ半導体である、GaN などの化合物半導体が多くの研究機関により検討されており、その次を見据えて、SiC 系、ダイヤモンド系デバイスの検討も始まっている。我が国は、化合物半導体の分野で優位性を保っていたが、この分野における諸外国の技術開発のペースも早く、ワイドバンドギャップ半導体の分野でも一層の注力が必要である。ワイヤレス分野のみならず、パワーエレクトロニクス全般にこの技術の果たす役割は大きく、通信行政の枠を超え、国全体で下支えすべき技術分野である。

無線通信・放送が行われている環境下で、その電力を収集しセンサーなど小型機器の電

力源として活用するエナジーハーベスティングも、近年注目されているワイヤレス技術の一つであり、やはりその受電部において高効率整流デバイスが必要であるが、特に、低しきい値、小型性も要求されるスペックであり、専用のデバイス開発の推進が期待される。

③ ミリ波・準ミリ波デバイス

ミリ波・準ミリ波は、5G 以降の無線システムではもちろん、無線 LAN、衛星間通信、レーダー・センシング、電波天文などの分野で今後活用が期待されている。化合物半導体およびシリコン CMOS 両面のデバイス技術が展開されているが、前者においては低コスト化に難がある一方、高出力・低位相雑音の面では有利であるといわれ、また、国産技術の従来の特長を活かせる事情がある。GaN デバイスなどミリ波帯での有効性も期待されるデバイス技術も進行しており、これを継続して育てていくべきである。後者においては、微細化・低損失化の競争がし烈であり国産技術の遅れが目立っている印象がある。CMOS 技術の量産化、高集積化と云う点での優位性は大きく、こちらについても諸外国の技術レベルに追随していかないと、将来ミリ波通信が実用される段階に入った際、技術面での海外依存度が高くなる懸念が発生する。

④ 「More Than Moore」デバイス開発

半導体プロセス技術についてはそろそろ微細化の限界も近づいており、アナログ・デジタル回路の混載などによる IC の多機能化や最新受動回路技術の付加などによる高性能化の方向性も示されており、未だ多くの新規技術発生の余地があると思われる。この技術分野への投資は、比較的すぐれた費用対効果が期待できる。

⑤ シリコンフォトリクスシステムとワイヤレスシステムとのインタフェース技術

シリコンフォトリクス技術では、数百 Gbps 以上の超高速通信の実現への期待が高まっているが、この技術を活かすためにもワイヤレス通信との融合が重要課題であると考えられる。シリコンフォトリクスの高速性に追随するように、ワイヤレスシステムとのインタフェース技術およびそのための光電変換デバイスなどの開発の重要性は高い。

5.8.1.3 将来技術の課題

本稿で取り上げた全ての技術課題①～⑧について、主な課題としてあげられる点をそれぞれ以下に示す。

① 無線通信用アナログデバイス

広帯域化と高効率化さらには、高周波数対応性といった観点から、我が国が比較的特長を保っている GaN や GaAs などの化合物半導体技術の採用が期待されるが、低コスト化に難点がある。低コスト化や高集積化に優位性を持つ CMOS 技術の微細化を極限に進め高周波数への対応を図ったり、化合物半導体技術を融合させる試みも進められており、5G 以降の通信システムが要求するデバイス性能と低コスト化の両立に対応するための技術競争は今後も継続すると思われる。現実的には、大型基地局用無線システムには化合物半導体、端末や小型基地局には一部 CMOS デバイスが適用されるなど、棲み分け・分担

されると思われるので、使いどころに応じたデバイス開発も必要となるであろう。

② ワイヤレス給電システム用デバイス

送電用デバイスとしては、高耐圧、高周波特性の両立に有利な GaN デバイスが有望であるが、課題の一つとして、格子欠陥に起因する電流コラプス現象により、高電力動作時に ON 抵抗が増加し効率低下につながる点があげられている。また、低コスト化の一層の推進も必要であろう。

受電用デバイスとしては、効率の良い整流回路を実現するために、耐圧の高い GaN ショットキーバリアダイオードが有望であるが、やはり低コスト化との両立が課題である。エネルギーハーベスティング用の受電デバイスとして、低しきい値特性を有する低コスト整流ダイオードデバイスの開発も進められるべきである。

③ ミリ波・準ミリ波デバイス

化合物半導体の場合は低コスト化、CMOS 半導体の場合は微細化に伴うオン電流の低下とオフ電流の増加や損失増大の問題を解決することが課題であると云われている。

④ 「More Than Moore」デバイス開発

CMOS プロセスとの相性が良い、他のデバイス技術、回路技術を見出し、それとの融合により新しい機能を創出する研究分野であり、広範囲にわたる研究開発が必要である。比較的新しい研究課題であり、多くの試みが進行している様子であるが、それぞれ低コスト化や実装技術の構築など、実用化までこぎつけることが最大の課題であると思われる。

⑤ シリコンフォトニクスシステムとワイヤレスシステムとのインタフェース技術

シリコンフォトニクスデバイスの高速性を損なわず、かつトレランスの高い接続性を有しながら、信号を空間伝送させることが要求されると思われる。例えば将来的にテラヘルツ通信が実用的となれば、その有力手段となり得るが、現状では信号源の位相雑音の影響が顕著となるという課題を解決するのは困難である。シリコンフォトニクスシステムの実用化に間に合う代替技術を開発する必要がある。

⑥ スーパーワイドバンドギャップデバイス技術

GaN や SiC あるいはその他のスーパーワイドバンドギャップ半導体のもつポテンシャルはまだ十二分に発揮されていない。格子欠陥に起因するデバイス性能劣化のメカニズムの解明と、それを活かした高性能デバイスの設計技術に関する研究を継続していかなくてはならない。

⑦ 新奇デバイス技術

量子効果スピントロニクスデバイスなど、新しいアイデアの創出を世界に先駆けて実用化することが課題といえる。また、その一部は上述の「More Than Moore」デバイス技術とも連携できる可能性がある。

⑧ テラヘルツデバイス技術

当面、センシングやイメージング用デバイス技術を先行させる必要がある。そのためには量産技術、低コスト化が課題となる。また現状、位相雑音低減の課題が重く、テラヘル

無線通信の実現は挑戦的と言わざるを得ないが、少なくとも固定通信への適用の方針は残すべきと考える。

5.8.2. 将来必要となる技術（新しい技術観点からの将来技術）

以上はワイヤレス通信技術用デバイスに求められている技術要件の観点で記述したが、ここでは、近年国として IT 政策の中心として位置づけている AI やビッグデータなどの技術との関連について述べる。AI やビッグデータのプラットフォームが将来的にはシリコンフォトニクス集積回路技術を適用した小型機器となるとすると、高速大容量信号伝送が求められるその IO インタフェース部に有線通信に変わってワイヤレス技術が適用できればスマートな接続が期待できる。したがって、前節で述べた技術課題「⑤ シリコンフォトニクスシステムとワイヤレスシステムとのインタフェース技術」は、まさに直接関連する技術課題である。AI やビッグデータなどに情報を提供するものの中には、多数設置されるセンサーデバイスも含まれる。そのセンサーに動作のための電力を供給し、さらには取得データを収集する際はワイヤレス通信が利用されることを考えると、「① 無線通信用アナログデバイス」、「② ワイヤレス給電システム用デバイス」も関連深い。また、センシングの対象によっては、特殊センサーの開発が必要となり、それには「④「More Than Moore」デバイス開発」、「⑦ 新奇デバイス技術」、「⑧ テラヘルツデバイス技術」とも関連性が出てくる。結局、AI やビッグデータ解析を活用するための IT インフラストラクチャの主要部分にワイヤレス通信技術が位置づけられているので、当然その関連性は深いものとなる。

5.8.3. 将来必要となる技術の世界の動向と日本のプレゼンス

5.8.3.1 世界と日本の技術レベル差

① 無線通信用アナログデバイス

5G 以降のセルラーシステム用デバイスに求められる技術要件として、特に重要であるのが広帯域化と高効率化といわれ、これにより適合する化合物半導体技術については、国産技術の優位性は保たれているといわれている。しかし、一方で力づくの微細化で CMOS 技術の台頭は目覚ましく、特にコスト面を考えると端末用デバイスは CMOS 技術に依存するのではないかと予想する。微細化 CMOS プロセスの世界技術レベルに追随することは多額の設備投資が必要で、国内民間企業の多くは撤退する方向の様子である。一部の大学等研究機関で保有する設備だけでは、国全体の当該分野の研究開発を支えるのに十分でない。結果として研究の進捗は世界レベルから遠ざかりいずれ挽回不可能となることが懸念される。

② ワイヤレス給電システム用デバイス

GaN やそれに関連するデバイス技術の国際競争力は、現在のところ比較的保たれているといえるが、諸外国の追い上げも目覚ましく安泰とはしてられない様子である。

③ ミリ波・準ミリ波デバイス

無線通信用アナログデバイスと同様である。最近、日本初の研究発表件数が減少の一途をたどっている点が気になる点である。

④ 「More Than Moore」デバイス開発

比較的新しい研究課題であり、「微細化」だけに頼らないところに、まだ活路を開ける余地が残されている。今後の十年間、国際的レベルに位置できるかどうかにとって重要であるとする。

⑤ シリコンフォトニクスシステムとワイヤレスシステムとのインターフェース技術

シリコンフォトニクス自体は、我が国でも精力的に研究が進められている分野であるが、ワイヤレスシステムとの融合という観点では、米国企業などに比べてやや遅れ気味ではないかと思われる。

5.8.3.2 日本の強み

化合物半導体技術に関する蓄積はあるものの、日本の製造業界では撤退する企業も多く、このままでは過去の遺物になりかねない。国としての対策が必要である。

5.8.4 国が取り組むべき技術項目

・国が業界や学会と一緒に取り組むべき協調領域と具体的技術項目

前述のように、業界が基盤技術に巨額の投資を継続していくことは難しい。国が率先してデバイス技術を IT 高度化社会やスマートシティ構想実現のための基盤技術として位置づけ、特に長期的に取り組む必要のある挑戦的な技術課題に対して研究支援を行っていく体制整備が重要である。現状、国内各企業がデバイス技術から撤退していく有様を、工学を志す若手人材が見ており、このままではデバイス分野の人材育成が崩壊する。国が企業を支援し、デバイス技術者の将来をも明るく照らす施策を打ち出すことが必要であり、そこに学会が加わって人材確保の仕組みを形成することが喫緊の課題である。

具体的技術項目としては、化合物半導体、シリコン CMOS、シリコンフォトニクス、新奇半導体デバイス開発などがまずあげられると考える。先の3者は、社会への貢献度の高い IT インフラ、エネルギーインフラの高度化の根幹となる高速無線通信、ワイヤレス電力伝送、高速信号伝送・処理を国産技術で賄うならば、是非とも世界的レベルを維持しなくてはならないし、いくつかの分野では世界をリードしなくてはならない。国全体として、応用技術のみならずデバイスなどの基盤技術にも注力するという方向性を示せば、若手研究者にとっても、持続的に目標を持ちやすい研究課題になるであろう。また、新奇半導体デバイス開発は、電子デバイス技術、量子デバイス技術など基盤科学に立脚する研究課題であり、たとえ直接的な実用化に至らないとしても、その技術レベルを維持すること自体が電子物性分野の研究者育成につながり、デバイス分野全体の研究開発者人材確保の効果が将来にわたって期待できるからである。

5.8.5 技術ロードマップ

将来システムと詳細技術の技術ロードマップを図 5.8.1 に表示する。

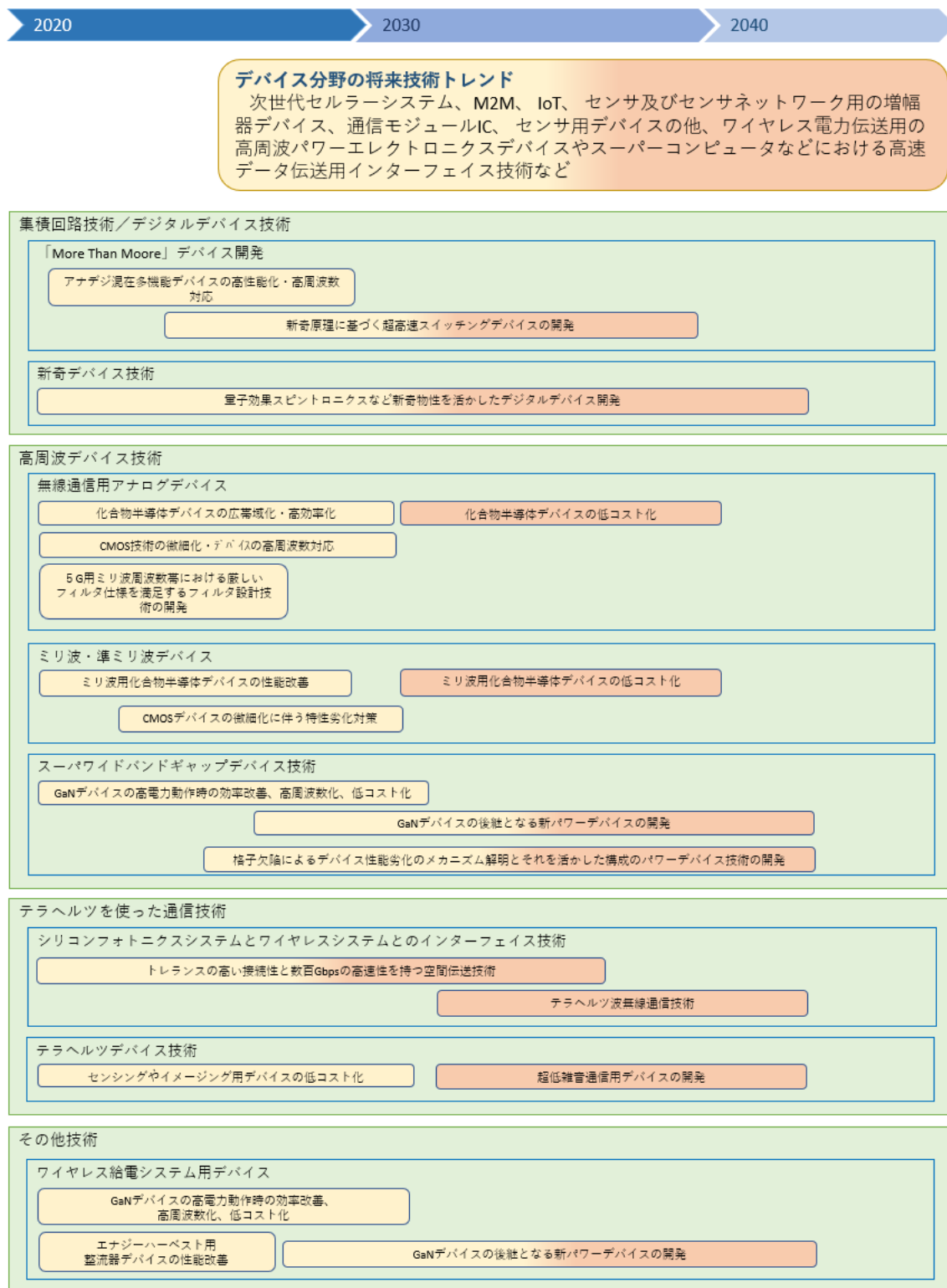


図 5.8.1 デバイス分野の技術ロードマップ

5.9 アンテナ・伝搬分野

執筆 : 菊間 信良 (名古屋工業大学 大学院 電気・機械工学専攻 教授)

執筆協力: 今井 哲郎 (東京電機大学 工学部 情報通信工学科 教授)

執筆協力: 宮下 裕章 (三菱電機 情報技術総合研究所 光電波・通信技術部門 統轄)

5.9.1 将来動向

5.9.1.1 将来技術の展望

アンテナ技術では、5G 以降の高速・大容量伝送、多数接続、低遅延を考えると、広帯域アンテナ、超多素子アレーアンテナ、および適応ビームフォーミング技術が大いに期待されるところである。基本的にはアンテナはシステムに合わせてデザインするべきであり、性能評価もシステムの中で行われることが望ましい。アレーアンテナに関しては、高機能な信号処理が導入され、超スマートアンテナとしてシステムや電波環境に応じて指向性が制御されることになる。自動車の追尾アンテナはその一つと考えられる。

超多素子アンテナの場合は特に、不等間隔素子配置のアレーによるビーム制御、素子間相互結合の低減、長距離エネルギー伝送を行う場合の超高指向性、ビームフォーミング性能のさらなる向上や広帯域化、アナログ/デジタル制御のハイブリッド化、リアルタイムデジタル信号処理技術、および低コスト化技術が必要な技術となる。衛星通信用のアンテナとしては、Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 衛星が登場し、衛星から小ビーム・動的ビーム形成が可能になるであろう。

コネクテッドカーを含む IoT (Internet of Things) がワイヤレスでネットワーク接続されると、IoT デバイス向けに劣悪環境下でも動作する小型アンテナ高効率実装技術が重要となる。フィルム状アンテナ等の適用領域の広いアンテナも期待される。また IoT デバイスの長時間稼働のためには、情報伝送のみならず無線電力伝送技術も並行して開発しなければならない。自動車の場合は、走行中給電が今後期待され、アンテナシステムの高効率化のみならずインフラの整備も検討課題となる。

電波伝搬では、高周波化に伴い、ミリ波/テラヘルツ波の高い周波数の伝搬計測および伝搬モデル化が不可欠で、ダイナミックレンジが広い測定器開発など計測技術も高い性能が必要となる。また、IoT デバイスやモビリティを含む伝搬モデルが必要となり、計測が益々複雑で困難となる。それ故、貴重な計測データが有効に蓄積され、ビッグデータという形の共有化により、伝搬計測と解析の精度が場所毎に精密化されることが期待される。また AI (Artificial Intelligence) の活用により伝搬モデル構築や通信エリア設計の効率化が期待される。加えて、広帯域・広覆域電波同時計測技術、フルデジタルサンプリングによる電磁環境再現技術、ハイブリッド電磁界解析によるシステムと電波環境を含む電磁プラットフォーム全体の解析技術、および電波可視化技術などが研究開発されるであろう。

伝搬シミュレーション技術では、材料物質の構造まで考慮した現実的な環境に基づいた大規模なシミュレーション技術が必要となるであろう。同時にシミュレータやエミュレータの開発も急がれる。伝搬シミュレーションが可能になると IoT、モビリティの開発にもブ

ラスになる。また、量子コンピューター等の新たな計算機インフラの電磁界解析への応用も期待される。

ミリ波／テラヘルツ波の高周波技術も高速・大容量伝送、低遅延伝送の観点から大いに期待され、上述のミリ波／テラヘルツ波の伝搬シミュレーションが重要なツールとなる。高周波用高出力デバイスおよび低損失材料の開発、高周波の測定器や計測技術の開発も必要である。レーダーの分野においても、高周波利用が進み、より精度の高い測距の可能性を探ることになる。特に、テラヘルツ波の分野は、国として大きなプロジェクトで対応しなければ海外との競争に遅れるのではという危惧がある。

その他としては、アンテナ素子のアクティブ化、メタマテリアルやアクティブデバイスなどの新素材活用は、応用範囲を広めることを目指して継続的に育てていくべきと思う。

5.9.1.2 将来技術のスペック

アンテナ技術では、キャリアアグリゲーションを行う場合、複数の周波数を扱えるアンテナが必要で、今後 IoT、5G／6G 向けを想定すると、設置場所の自由度が高くなる、アンテナの小型化、薄型化が重要となる。フィルム状アンテナも大いに期待される。

アレーアンテナとしては放射素子の面積内に独立な送受信モジュールが形成された超多素子のアンテナが実用化に向かっている。1000 から 10000 素子数クラスの超多素子 DBF (Digital Beam Forming) アンテナがリアルタイム運用可能になれば、端末の位置を正確に推定し、超スポットビームで通信が可能となる。また高効率な無線電力伝送も可能となる。

電波伝搬では、今後技術の発展のために、伝搬測定データの蓄積とデータベース化、および共有化が必要である。特にミリ波、テラヘルツ波の伝搬測定データは貴重であり、データの共有化は高周波技術の更なる発展に不可欠と考える。また AI の活用も高精度な伝搬モデルの構築や通信エリアの設計のために積極的に検討すべきである。

伝搬シミュレーション技術では、都市構造のみならず、材料物質や人体まで考慮に入れたシミュレーション技術が必要となる。建造物のデータベースを構築する技術（ビッグデータや AI の活用）も並行して必要であろう。大多数のデバイスがある場合や複雑な伝搬解析には伝搬シミュレーション／エミュレーションが有効で、これにより通信システムの最適化を行うことができる。

ミリ波／テラヘルツ波の高周波技術では、やはり伝搬シミュレーション技術の構築が必要である。それに加え、高周波用高出力デバイスおよび低損失材料の開発、高精度でダイナミックレンジの広い高周波の測定器や計測技術の開発も必要である。特に、テラヘルツ帯アンテナ技術、テラヘルツ波生成技術も益々進化させなければならない。現在、自動車レーダーはミリ波帯が使われているが、今後、テラヘルツ波へと高周波化され、テラヘルツ波ならではの高精度なイメージング技術の構築・実用化に向かう。

5.9.1.3 将来技術の課題

アンテナ技術では、システムや電波伝搬状況に合わせたアンテナ設計および製作が益々必要となり、性能評価もシステム全体で行われることになる。テラヘルツ波アンテナの製造・製作技術、評価技術も課題となろう。

超多素子アンテナでは、現状、フルデジタルでビームフォーミングを行うことが困難なので、アナログビームフォーミングとデジタルビームフォーミング (DBF) のハイブリッド構成が主流となるであろう。この場合、アナログ部とデジタル部の機能配分を決めることが1つの課題と考える。

伝搬計測／解析技術では、高精度でダイナミックレンジの広い測定器の開発、および測定した伝搬データをどのように蓄積し共有化させるかが課題としてあげられる。

伝搬シミュレーション技術、特に高周波の伝搬シミュレーション技術では、人体を含む材料物質の構造まで考慮しないといけなくなる。このように大規模なシミュレーションとなるため、効率的なシミュレーション方法の構築が課題となる。RF システムが多数ある場合の干渉や多重反射での伝搬は、エミュレーション技術で行うほかないと言われており、より現実的な伝搬を再現する多機能で多様性の高いエミュレーション技術を構築しなければならない。

ミリ波／テラヘルツ波の高周波技術では、高安定なテラヘルツ波生成技術の開発、および高精度に振幅と位相が測定できる測定器の開発が必要である。高周波の伝搬計測においても、計測データは貴重なので、有効活用するために、共有を想定したデータベースの構築が課題としてあげられる。

5.9.2 将来必要となる技術

5.9.2.1 課題解決に必要な技術項目

アンテナ技術では、広帯域アンテナ、小型・薄型アンテナが必要な技術である。超多素子アンテナにおいてはアレー信号処理を基本として DBF 技術が課題解決に必要な技術となる。特にアナログビームフォーミングをサブアレーとしたアレーオブアレー (array of array) の考え方が課題解決の鍵となる。伝搬計測および解析技術においては、精度の高い電波伝搬計測技術の確立と伝搬モデルの構築が重要となり、測定データの蓄積および共有化、測定データなどからなるビッグデータと AI を活用した電波伝搬シミュレーション技術が必要な技術と言える。特に、人体を含む材料物質や移動体のある伝搬環境を考慮に入れた大規模電波伝搬シミュレーション技術が伝搬モデル構築には必要となる。ミリ波／テラヘルツ波の高周波技術では、基本的ではあるが、製作精度の高いアンテナ製造技術、高精度な伝搬測定技術が課題解決に必要な技術項目としてあげられる。またメタマテリアル／メタサーフェイスもアクティブ素子と組み合わせて、応用範囲や利用可能性を探りながら性能向上していくと考える。

5.9.2.2 詳細技術の説明と目指すべき技術レベル

広帯域アンテナは複数の周波数をカバーする複合アンテナの実現が目標となる。アンテナの大きさ（体積）と必要帯域幅のバランスを、応用分野に合わせて設定することになる。超多素子アンテナおよびDBF技術はアナログビームフォーミングとデジタルビームフォーミングのハイブリッド構成が有力なシステム構成となり、アナログ部とデジタル部の配分が性能の決め手となる。また、アナログ部の損失低減も重要となる。一般に、フルDBFと比べ、ハイブリッド方式はビームフォーミング性能の差（低下）が生じることが予想されるが、性能差が許容できる構成する設計技術を目指すことになる。電波伝搬計測と解析には移動体の動きなどを含む伝搬環境の時変化を考慮に入れた大規模シミュレーションが期待され、よりリアルな伝搬モデルを構築するために、測定データ（ビッグデータ）と機械学習／ディープラーニングを用いたAIシミュレーションや量子コンピューターを用いた新たな解析手法の確立を目指すべきと考える。同時に、測定データの蓄積と共有化が効率的に行えるスキームをつくることが不可欠である。ミリ波／テラヘルツ波の高周波技術では、高安定信号発生技術とダイナミックレンジの広い測定技術の確立が当面目指すところである。

全体的には 5G/6G および自動運転を支えるアンテナ・伝搬技術を目指すことになる。

5.9.2.3 新しい技術観点からの将来技術

超多素子アンテナのアレー構成、素子配置が性能向上の幅を広げる。高周波化、アクティブ化にともなう新たなメタマテリアル技術の創出も期待される。学習するアンテナとしてアダプティブアンテナが登場したが、これからは、機械学習やディープラーニングにより学習する超スマートアンテナに進化すると思われる。無線電力伝送では近接から遠方までシームレスに送信できる技術が登場すると思われ、電気自動車の長距離・長時間運転を実現するための走行中給電はインフラ整備とともに新しい将来技術として期待される。海中電波通信や海中ドローンの無線制御も、空中、海中を問わず、ワイヤレスネットワークを構築する新しい技術として研究が始まっており、進展が望まれる。

5.9.3 将来必要となる技術の世界の動向と日本のプレゼンス

5.9.3.1 世界と日本の技術レベル差

アンテナ技術と超多素子アンテナ技術では、日本の技術レベルが海外と比べやや高いと思われる。伝搬計測／解析技術、伝搬シミュレーション技術、ミリ波／テラヘルツ波の高周波技術においては、日本のレベルはやや劣っているとみられている。全般的に、先人からの技術の継承については改善すべきところがあるように思われる。例えば、アンテナの理論解析技術については、そのレベルはかつて非常に高かったが、これらの解析スキルが完全に伝承されているとは言い難い。また、技術発信力など海外の勢いに遅れをとっていると感じる。

5.9.3.2 日本の強み

日本の強みは、学会主催で研究会やワークショップなどを多彩に開催し、技術力向上に励んでいることが挙げられる。先人のアンテナ技術、アンテナ測定技術、電波伝搬解析技術、DBF 技術など、今後、不可欠と思われる技術は、次の世代に引き継ぐためにセミナーやワークショップを積極的に開催している。このような勉強会や研究会を通して、技術交流するところが日本の特長の 1 つである。最近では、複数の研究会が集まって横断型研究会も開催されるようになり、分野を超えた幅の広い研究を行える土壌づくりも日本の強みと言える。

5.9.4 国が取り組むべき技術項目

ミリ波／テラヘルツ波を用いるアンテナ技術、伝搬計測技術、伝搬シミュレーション技術は包括的に国が業界や学会と力を合わせて取り組むべき協調領域として挙げられる。特に伝搬については測定データを蓄積し、共有化することがアンテナ技術および伝搬モデルの発展に繋がる。逆に協調なしでは進展し得ない領域とも言える。AI やビッグデータを活用した伝搬解析および超スマートアンテナ（超多素子アンテナ）も、協調領域として発展させる必要があると考える。

5.9.5 技術ロードマップ

将来システムと詳細技術の技術ロードマップを図 5.9.1 に表示する。

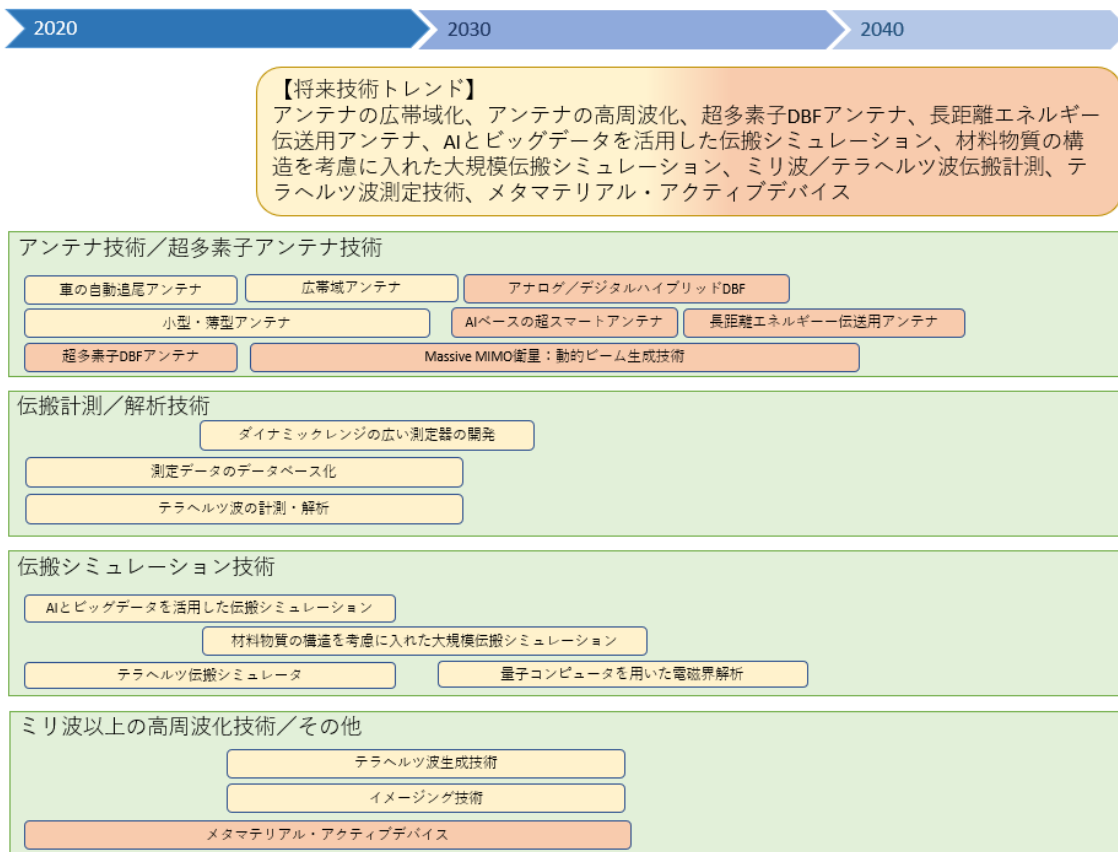


図 5.9.1 アンテナ・伝搬分野の技術ロードマップ