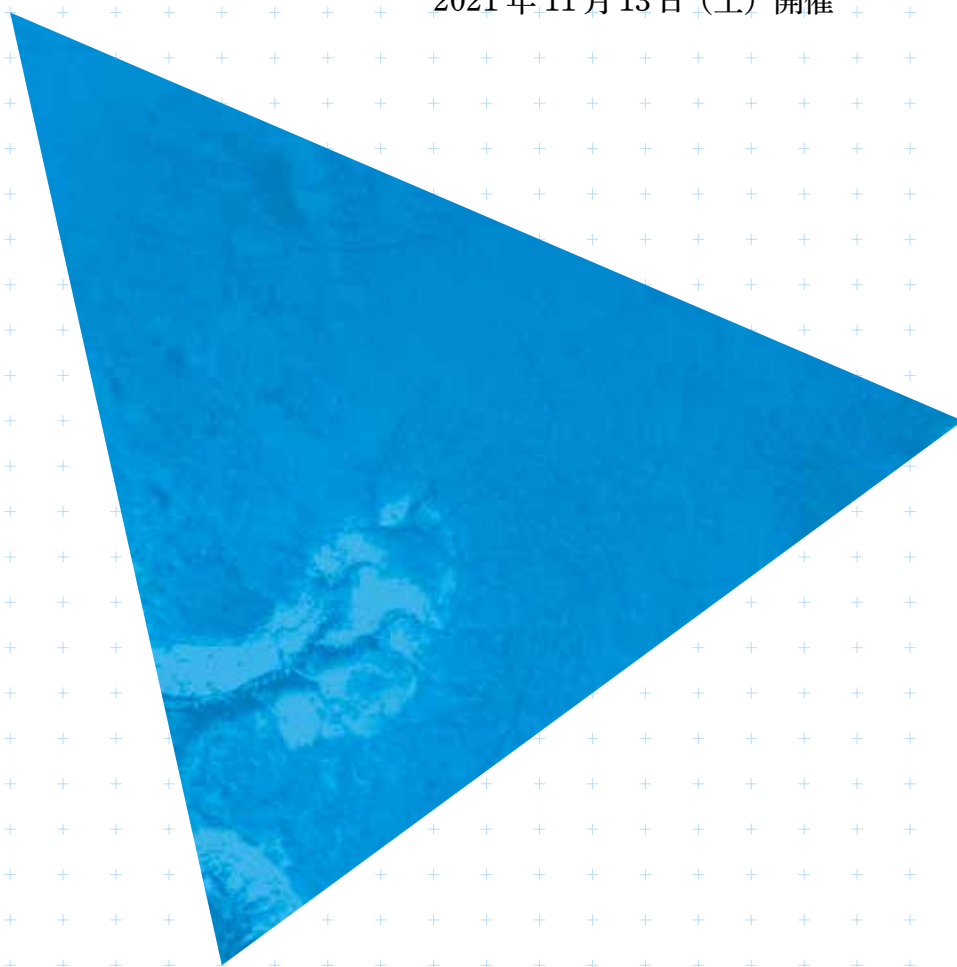


科学技術未来戦略ワークショップ報告書

次世代通信技術の 高度化に向けた 無線・光融合基盤技術

2021年11月13日（土）開催



エグゼクティブサマリー

本報告書は、国立研究開発法人 科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が令和3年11月13日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ（WS）「次世代通信技術の高度化に向けた無線・光融合基盤技術」に関するものである。

近年、高度なデジタル社会の実現に向け、フィジカル空間とサイバー空間をつなぐ高速・大容量・低遅延・多接続・低消費電力・セキュアな次世代の通信技術が期待されている。これまでの通話やメールなどの個人の利用だけでなく、工場、農業、サービスなどの産業面での利用、災害時での接続確保など社会インフラ・基盤としての役割も重要になってきている。特に、IoTを活用した様々なサービスの提供が期待されるモバイルエッジコンピューティングなどでは、応用やサービスに適した様々な形態のネットワークの構築が重要になる。移動無線通信は5Gのサービスが始まることで高速・大容量化が進み光通信との差が小さくなってきており、今後は無線通信技術と光通信技術のそれぞれの特長・利点を活かしたネットワーク構築に向けた技術開発やシステム設計が必要になる。このため、Beyond 5G/6Gに向けた研究開発が世界的に活発になっている。一方、これまで無線通信の高速・大容量化は数百MHz～数GHzの周波数の電波を用いて、主に通信方式の高度化により行われてきたが、今後はさらなる高速・大容量化に向けてテラヘルツ波（THz波）といった未踏の周波数領域の利用が重要になると考えられる。THz波はこれまで使われてきた電波と光の間の周波数領域であり、高効率・低消費電力の発振・増幅・検出デバイス・回路、空気による減衰の影響を低減する指向性アンテナなど様々な技術的課題があり、これまでの無線通信と光通信、エレクトロニクスとフォトリソグラフィーの知見や技術の活用や新たな原理・発想による技術（無線・光融合基盤技術）の創出が不可欠である。

本ワークショップは、無線・光融合基盤技術に関わる研究開発戦略策定を目的に開催した。ここでは、無線・光融合基盤技術として今後取り組むべき重要な研究開発課題や、それを実施する研究開発の体制・仕組みなどに関するCRDSの仮説（骨子案）を提示し、将来の社会像とそこでの次世代通信技術に対する応用面からの要求と期待、技術展望とコンソーシアムとしての取組、挑戦的な無線・光融合基盤技術の研究開発などについての話題提供を基に、総合討論で我が国が取り組むべき研究領域や、効果的な研究体制、異分野連携・産学連携、人材育成などについて議論した。

CRDSの仮説として、①技術競争力の強化の観点では、光および無線に関するこれまでの技術蓄積を活かし、各々の技術の長期的な戦略と無線・光融合基盤技術に関する具体的な研究開発課題の設定が必要であり、高価な高周波測定・評価装置の共用施設、デバイス・モジュールの作製が可能なエコシステムの整備、長期的なファンディングが必要なこと、②産業競争力の強化の観点では、次世代通信システムだけでなく、コンピュータネットワーク、レーダー、センサなどへの応用も考慮し、デバイス・モジュールの高性能化、小型化、低消費電力化、低価格化の研究開発を行うとともに、デバイス・回路などの革新技术創出とその特許化で先行し、国際標準化活動経験のある大学教員、国内企業・コンソーシアムや関係府省と連携した国際標準化活動が必要なこと、③国際的に日本の存在感を示すという観点では、無線・光融合基盤技術を主軸に、無線、光、材料、デバイス、回路などの異分野の研究者・技術者が集まる新たなコミュニティを形成し、新たな学術領域研究を活性化していくことが効果的なこと、を示した。

話題提供では、①無線・光融合が拓く次世代通信技術に対する要求と期待に関して、「無線・光融合が拓く次世代通信技術への要求」、「バーティカルサービス×次世代通信×日本」、「遠隔医療・手術ロボットからの次世代通信技術に対する期待」、②次世代通信の技術展望とそこに向けた既存のコンソーシアムの取組に関して、「6Gの進化の方向性」、「Beyond 5Gに向けた研究開発」、③次世代通信技術に向けた挑戦的な無線・光融合基盤技術の研究開発に関して、「THzシステムに向けたデバイス・回路技術」、「Massive MIMOの

限界とブレークスルー技術」、「THzメタサーフェス技術」、「無線・光融合に向けた異種材料集積光回路技術」、「高周波材料特性評価技術」が紹介された。

総合討論では、CRDSの骨子案や話題提供の発表と質疑、事前アンケート結果を踏まえ、システムの視点から取り組むべき研究開発課題、研究開発の推進方法・体制、コミュニティ形成と人材育成に関して議論を行い、以下のような方向性が示された。

(1) システムの視点で重要になる要素技術の研究課題

- ・新原理に基づく高効率・低消費電力の光電変換デバイス
- ・ビームフォーミングを含めたアンテナ技術、高効率光電変換等の技術、異種材料接合技術、材料・機能の集積化技術
- ・ネットワーク機器の正確な時刻合わせのための原子時計などによる高精度時刻同期技術

(2) デバイスや材料の研究課題

- ・量産性・再現性・コストも含めて高出力・高効率な高周波用化合物半導体デバイス
- ・テラヘルツ帯の材料特性評価技術、低損失の導電体材料・誘電体材料、誘電体導波路

(3) 異分野の研究者を連携させる仕組み・研究体制

- ・テラヘルツ領域の個々の要素技術をシステムでの利用に向けて繋いでいく仕組み
- ・研究開発した先進的な素子や装置をコンペやイベントで他の研究・開発グループ等実際に使用してもらい、関係者を広げていく仕組み
- ・国の研究機関をベースとした高周波計測装置、デバイス試作装置・設備の共用化と長期的に維持していくための仕組み作り、および各大学における個々の装置のレベルの底上げ

(4) アカデミアと産業界との連携、コミュニティ形成、国際標準化活動、海外連携

- ・学会などでの企業が直面している通信システムの様々な問題点・ニーズの産学での共有と、これらの課題への連携した取り組み
- ・国などの公的資金を使ったアカデミアと産業界の接続
- ・次世代通信技術のシナリオの国内外のステークホルダーとの共有

(5) CRDSの仮説、人材育成などに関する意見

- ・大きなビジョンを描いた上で、アカデミアと企業を集めるシナリオ・ストーリー、およびそのビジョンを実現する研究開発の実施が重要
- ・次世代通信の研究開発には音頭をとる人（オーケストレーター）とともにダイバーシティが重要であり、多様な人材を巻き込んだ取り組みが必要

ワークショップでの議論を踏まえ、CRDSでは今後国として重点的に推進すべき研究領域、具体的な研究開発課題を検討し、研究開発の推進方法も含めて戦略プロポーザルを策定し、関係府省や関連する産業界・学界等へ提案する予定である。

目次

1	ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明	1
	曽根 純一、馬場 寿夫 (JST-CRDS)	
2	無線・光融合が拓く次世代通信技術に対する要求と期待	8
2.1	無線・光融合が拓く次世代通信技術への要求 竇迫 巖 (NICT)	8
2.2	パーティカルサービス×次世代通信×日本 森川 博之 (東京大学)	15
2.3	遠隔医療・手術ロボットからの 次世代通信技術に対する期待 菅野 貴皓 (リバーフィールド)	20
3	次世代通信の技術展望とコンソーシアムの取組	28
3.1	6G の進化の方向性 須山 聡 (NTT ドコモ)	28
3.2	Beyond5G に向けた研究開発 中尾 彰宏 (東京大学)	35
4	次世代通信技術に向けた挑戦的な 無線・光融合基盤技術の研究開発	42
4.1	THz システムに向けたデバイス・回路技術 永妻 忠夫 (大阪大学)	42
4.2	Massive MIMO の限界とブレイクスルー技術 本城 和彦 (電気通信大学)	50
4.3	THz メタサーフェス技術 真田 篤志 (大阪大学)	57
4.4	無線・光融合に向けた異種材料集積光回路技術 西山 伸彦 (東京工業大学)	63
4.5	高周波材料特性評価技術 加藤 悠人 (産業技術総合研究所)	69
5	総合討論	
	ファシリテーター：岩本 敏 (JST-CRDS)	75
付録		83

1 | ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明

曾根 純一、馬場 寿夫（JST-CRDS）

はじめに今回のワークショップを企画した背景について簡単に説明する。サイバー世界と我々が生活する物理的な世界との融合に向けて、社会は確実に進みつつあると認識しているが、そこで重要になってくるのがそれらを接続する通信の技術である。無線通信の5Gが実用化されて、現在はポスト5Gの議論がなされているが、そこでは周波数帯としてサブテラヘルツ、さらにはテラヘルツの可能性すら議論されている。まさに通信容量で無線が光の領域に挑戦し迫りつつあると認識している。そこでは、光と無線、すなわちフォトニクスとエレクトロニクスの技術が融合する新しい世界が待っているように思う。ポスト5Gに向かっては、既に総務省や経済産業省のプロジェクトが動きつつあるが、このフォトニクスとエレクトロニクス融合の新しい可能性追求に向けては、人材育成も含めて学の世界、アカデミアの世界も積極的に関与すべきではないだろうか。次世代の通信技術開発については、文部科学省やその関連機関も加わって府省連携で取り組むべき大きなテーマだと考え、このワークショップを企画した。

CRDSでは調査・検討チームをつくって、多くの有識者へのインタビューを実施してきた。これから検討結果として、どのような技術課題に取り組むべきか、またそれをどのような研究体制で実行すべきなのか、我々の仮説を提示する。まだ考えの至らぬところも多いと思われるので、ポスト5Gの世界を牽引しておられる先生方に我々の仮説に対する意見をいただくとともに、この分野の研究開発はいかにあるべきか、現状は海外に対して決して優位に立っているとは言えないが、この分野の研究開発で日本が存在感を高めていくにはどうしたらよいか、徹底的に議論したい。



図1-1 次世代通信技術による新たな社会的価値の創造と考慮すべき事柄

今回の活動の背景とCRDSでの検討状況について簡単に紹介する。次世代の通信技術は世界中で注目されており、無線については5Gが開始され、Beyond 5Gや6Gの議論が始まっている。このような次世代通信技術は図1-1に示すように暮らしや健康・医療、モビリティ、産業といった広い分野に使われていく技術である。また、安心・安全な社会、インクルーシブな社会、サステナブルな社会の実現に向けた活用が期待される。このように期待される面もあるが、一方では気になる側面もある。例えば、通信障害が起こったときに医療ミスや自動車事故につながった場合に責任の所在をどうするかといったことか考えられ、通信技術だけを考えるのではなく、応用や社会まで含めて広く議論することが必要な領域だと思っている。

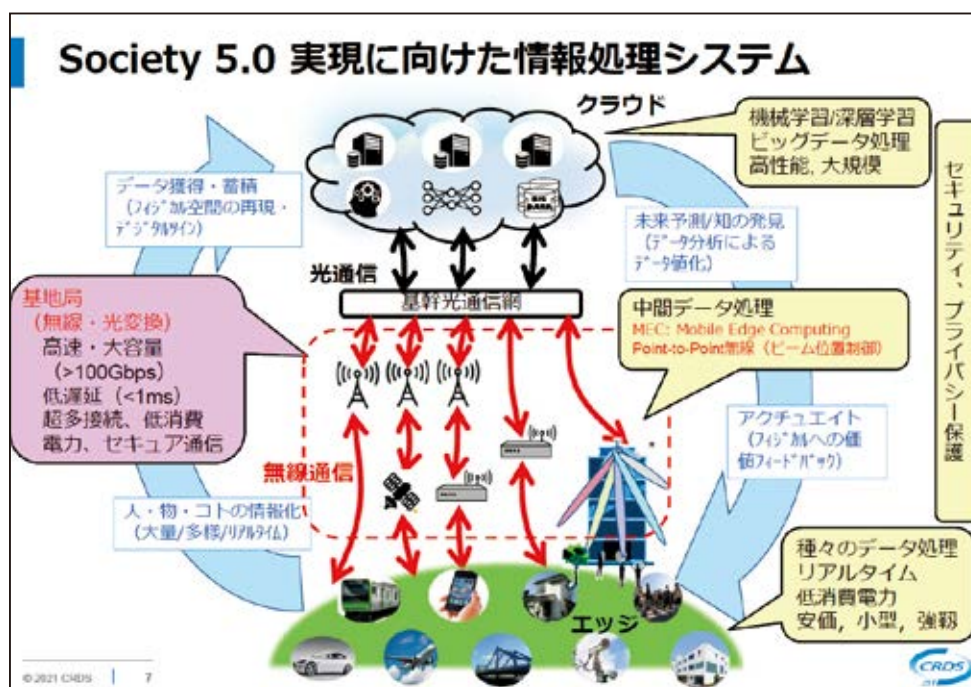


図1-2 Society 5.0実現に向けた情報処理システム

日本ではSociety 5.0の実現が期待されており、その中では図1-2に示すようにクラウドからエッジまでを多様な通信形態でうまく結びつけていくことが重要になる。今回の調査は、赤い破線で囲った部分で主に無線通信と光通信を連携させるようなところを中心に行った。最近の動向としては、クラウドでのコンピューティングだけでなくエッジに近いところでのコンピューティング（モバイルエッジコンピューティング）といったところも注目されるようになってきているので、このような領域も含めて、どのような技術開発が必要になっていくのかを明らかにしていきたいと考えている。

無線通信の代表である移动通信システムの進化の歴史を振り返ると、1980年代の第1世代からほぼ10年毎に世代が変わり、今は第5世代となって通信容量は飛躍的に伸びている状況である。この先もこの傾向が続くことが期待されているが、そんなに簡単に技術が進むのか疑問なところもある。また、無線通信が個人の利用から公共サービス、ビジネス利用、社会基盤としての役割といったところも非常に重要になってきているので、これらも含めて新しい技術については考えていかなければいけない。

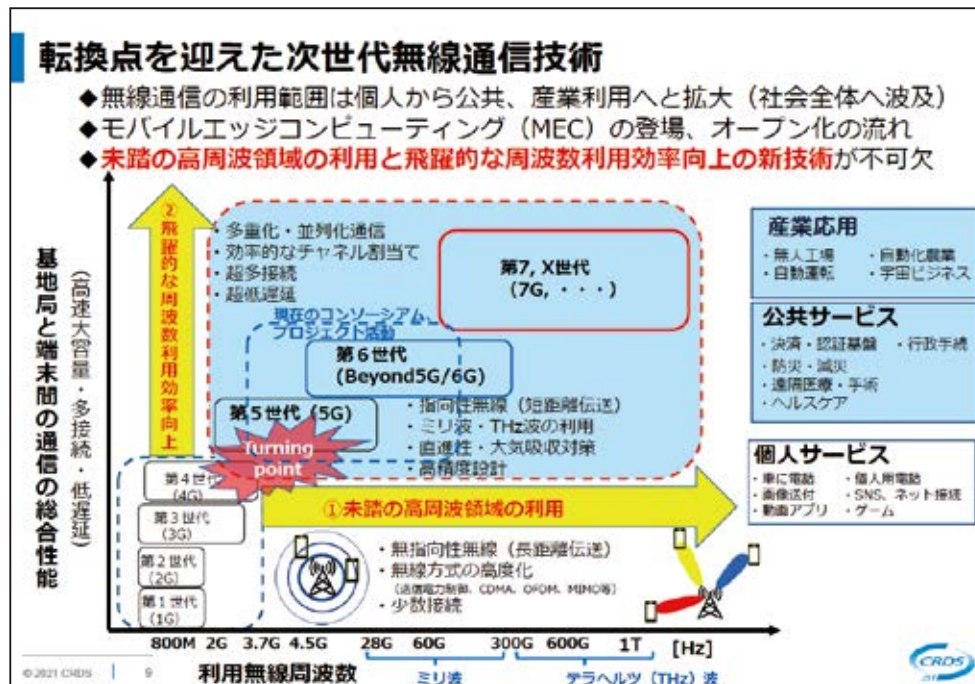


図 1-3 転換点を迎えた次世代無線通信技術

現在の状況と将来の方向性について我々の認識を図1-3にまとめており、現在は転換期を迎えているのではないかと考えている。グラフの横軸は利用する無線の周波数、縦軸は通信容量などの総合性能を取っている。第4世代までは、1GHz周辺の周波数を使って無線方式の高度化により性能向上を図ってきた。それに対し、第5世代からは周波数領域を大きく拡張していこうという流れが出てきた。次の第6世代やさらに先の第7世代となれば、テラヘルツ（THz）領域まで拡張されると思われる。このため、今後は周波数の有効利用効率向上と未踏の高周波領域の利用といったところが必須になってくるので、まさに今が転換期にあると我々は捉えている。例えば、今までは無指向性のアンテナが主であったが、今後は大気中での減衰の大きいミリ波やテラヘルツ波を必要とところだけ効率的に届けるビーム制御といった技術も重要になり、このような変化に対応する様々な新しい技術が必要になってくると考えている。

国内外の動向についてはBeyond 5G/6Gに関する様々な白書の中でも述べられているが、アメリカ、ヨーロッパ、中国、日本、それぞれでテラヘルツに至る高周波領域の技術開発や、光と電気のハイブリッド技術に関する研究開発が進められている。このような状況の中で、日本としても研究開発でリードし産業としても世界の競争に勝っていく必要があるので、10年先に実用化する技術だけでなく、もう少し先を見越して、新たな技術を創出する長期的な研究戦略を立てていく必要があると考えている。

日本においてもすでに総務省・NICTや経済産業省・NEDOでBeyond 5G/6Gやポスト5G関係のプロジェクトがデバイス、回路、集積・実装、ソフト、システムといった技術レイヤーで進められているが、これだけでは十分ではないという思いがある。そこで、我々なりに次世代通信に関わる技術としてどのような技術が必要になっているかを俯瞰的にまとめたものが図1-4である。

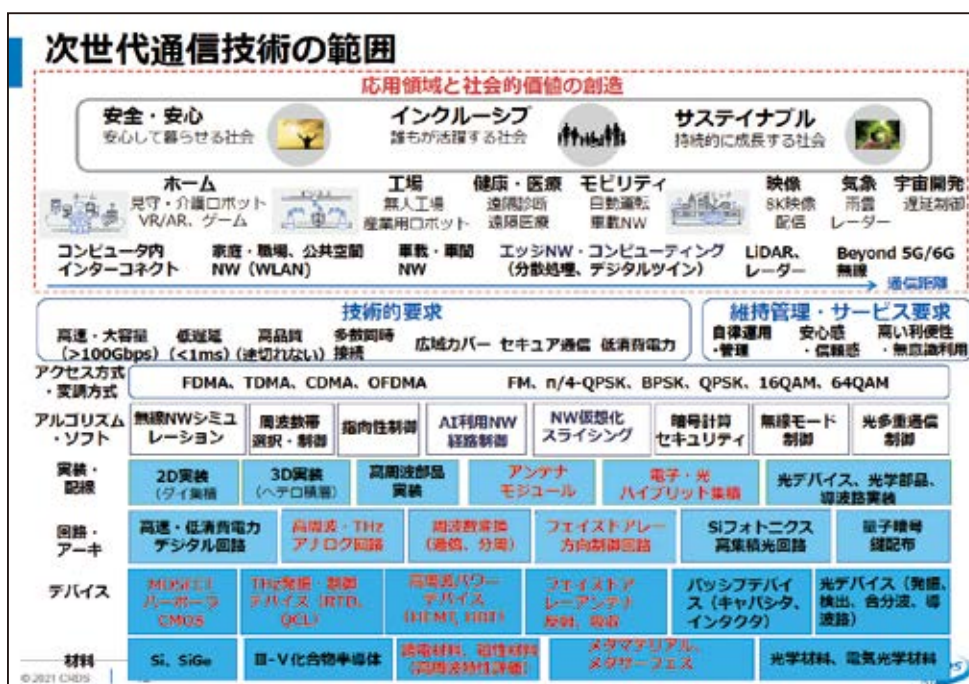


図1-4 次世代通信技術の範囲

この図では、下の方に材料、デバイス、回路、実装といった技術レイヤーがあり、上の方にソフト、アクセス方式、技術的要求、サービスの要求、応用領域をまとめて示している。これまでの調査を基に検討した結果、今回は下の方の赤色で記載したようなハードウェアに関わる部分を中心に提言したいと考えている。もちろん、上の技術レイヤーを知らないで下の部分だけを議論しても役に立たないということもあるので、調査としてはこの図全体に関わる様々な有識者（30名以上）にインタビューを行っており、有識者の意見・コメントを参考に、ハードウェア関係としてやるべき事柄をまとめているところである。

日本で行われているプロジェクトを簡単にマッピングしてみると、総務省・NICTのプロジェクトは主に上位レイヤーにあり、大凡5年から10年先の実用化を見越したプロジェクトが進んでいる。また、経済産業省・NEDOでもポスト5Gのプロジェクトが進められており、下のレイヤーのハードウェア関係も部分的に入っているが、全てをカバーしているわけではなく、また研究ターゲットとしてはやはり5年から10年の実用化を目指したものと思われる。このような状況から、これらのプロジェクトでカバーされていない長期的な視点で取り組むべき領域があると思われ、そのような長期的視点での研究開発に関して主に提言していきたいと考えている。

我が国の問題点を簡単にまとめると次のようになる。1つは次世代の無線通信技術の研究開発が少し遅れていること、もう一つは5G対応の遅れなどで通信関係の産業が弱体化していることがある。さらに、通信関係のコミュニティでの人材不足、連携不足や、国際的な存在感が低下しつつある。これらを問題点と捉えており、これらに対して解決策を示していく必要があると思っている。

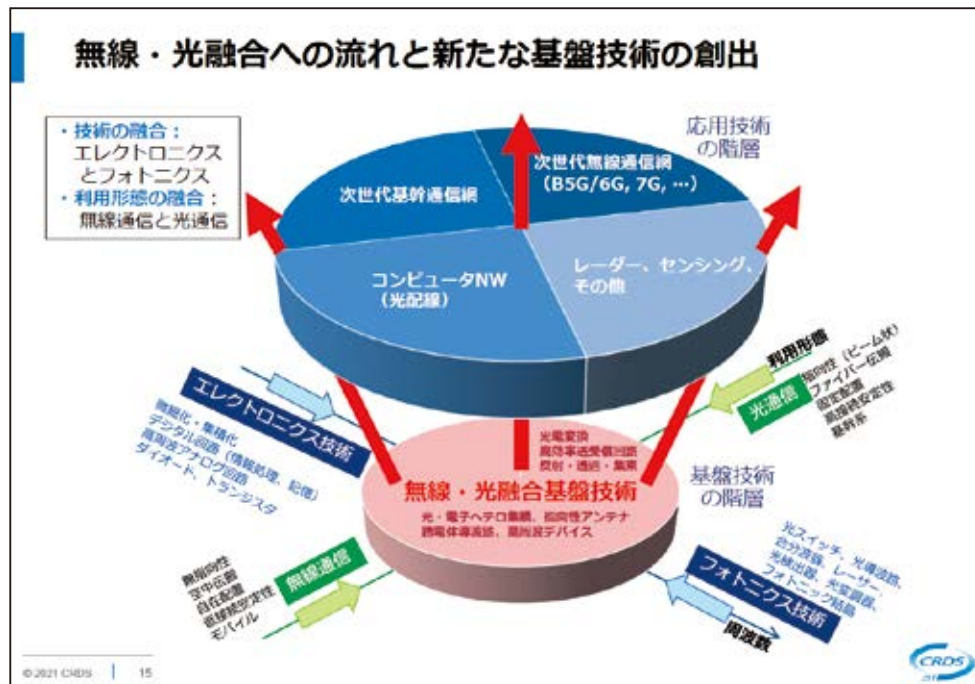


図1-5 無線・光融合への流れと新たな基盤技術の創出

最近では無線通信の通信速度・通信容量が光通信の性能に近くなってきている。また、エレクトロニクスとフォトニクスといった技術分野の融合（光電融合技術）が進みつつある。先の述べた未踏の周波数領域はまさに光通信とこれまでの無線通信で使っていたものとの中間に存在する領域であり、図1-5に示すように、これまでの両者の知見をうまく活用して無線・光融合の基盤技術を創出することが重要になる。このような基盤技術を活用して、光通信による次世代の基幹の通信網、あるいは次世代の無線通信網の構築を進めていく必要がある。また、同じ基盤技術が使えと考えられるコンピュータネットワーク、あるいはレーダーやセンシングの動向も見据えて基盤技術を研究開発していくことが必要である。図1-5に示した「利用形態の融合」については、無線通信と光通信のそれぞれの長を活かした一体的な活用が今後重要になってくると思われる。無線は使いやすさといった点で非常に優れており、光は高速性の面ではまだ長けているので、そういった両者の良さを活かした様々なシステムが構築されると思われる。また、両者をうまく活用するための技術も必要になる。エレクトロニクスとフォトニクスの「技術の融合」については、様々な先端デバイス（トランジスタ）の開発、メタサーフェスといった新たな材料の利用、方向性を制御するフェイズドアレーアンテナ、新たな誘電体導波路などが重要になると考えている。また、これらを一体的に集積していく技術も重要になると考えている。

このような研究開発課題を簡単にまとめたものを以下に示す。

・未踏の周波数領域の利用に向けて

無線・光融合による、高精度なアンテナ指向性の制御、無線通信エリアの確保のためのメタサーフェスなどによる電波の反射・透過・集束の制御、高効率な発振・受信・変調デバイス・回路、高周波用低損失基板材料・構造、高精度な高周波材料特性評価手法、AIによるビーム形状・スキャン設計など

・飛躍的な周波数利用効率向上に向けて

多重アンテナ制御（MIMOなど）、超多重化（OAMなど）

・高速化・低消費電力化・高信頼化・低コスト化に向けて

光デバイス、ベースバンドのデジタル回路、高周波アナログ回路、アンテナなどの異なる材料・デバイスを一体化するハイブリッド集積化およびモジュール化技術

未踏の周波数領域の利用に関する様々な技術、飛躍的な周波数利用の向上に対する技術が必要である。さらには基盤技術として通信だけではなく他の応用分野にも活用していくという視点から、高速化・低消費電力化・高信頼化・低コスト化に関する技術が不可欠であり、様々な材料・デバイスを一体化するハイブリッド集積化やモジュール化技術が重要になると考えている。

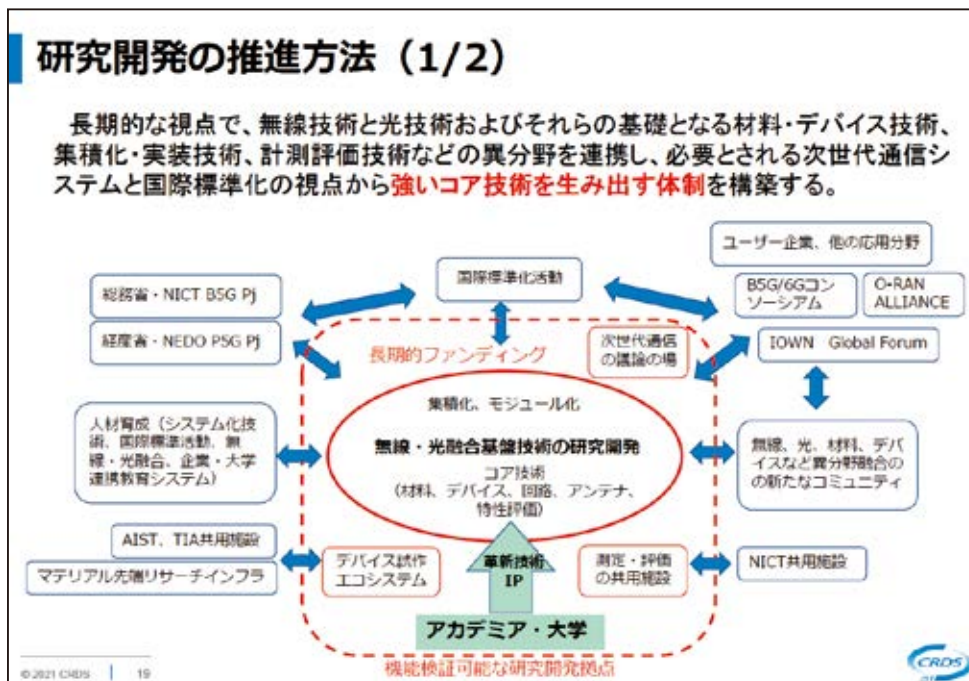


図1-6 研究開発の推進方法

このような研究開発を進める推進方法の案を図1-6に示す。この図の中央部に上記の研究開発課題があるが、このような課題に取り組むには大学などのアカデミアが持っている新しい技術、革新的な技術を活用していく必要がある。さらに、ハードウェアの研究開発を進める上ではデバイス試作やそれらの測定・評価などが重要であるが、高周波の測定装置が非常に高価といったことや、デバイス試作のプロセスラインが大学にはないといった問題があり、共用の装置を利用できる施設をつくることや、デバイス試作のエコシステムをつくっていくことが重要である。国の研究機関などにも既存の共用施設があるので、それらとの連携も含めて考える必要がある。

また、新しい技術に挑戦するためにはアカデミアの貢献が重要になってくるので、従来の光通信や無線通信だけでなく、材料やデバイスなど異分野の人たちも入ってこられるような新しいコミュニティをつくっていく必要がある。人材育成という意味でもこのようなコミュニティの活動が重要になってくると考えている。

通信の技術分野は技術開発だけではなく国際標準化活動が非常に重要であり、これに対しても日本から必須特許として新しい技術を提案していく体制を考える必要がある。そのためには、社会とのつながりも含めて次世代通信に対する議論の場を設けることが重要であろう。ここでは、Beyond 5Gのコンソーシアム、IOWN、O-RANなどの人たちも含めて議論していく必要があると考えている。また、総務省・NICTや経済産業省・NEDOのプロジェクトなどとの連携も重要になると考えている。このように広い範囲での連携を図りながら体制づくりをやっていく必要があると考えている。

次に、検討中の仮説を図1-7に示す。ここでは、技術競争力の強化の観点、産業競争力の強化、日本の存在感といった3つの視点から記載している。先に述べたような研究開発や研究の推進方法・体制を実行することによって、日本の技術力が向上し、産業競争力の強化にも貢献するとともに、学術的にも日本の存在感を

世界に示していけるのではないかと考えている。

検討中の仮説

- ① **技術競争力の強化の観点**では、**光および無線に関するこれまでの技術蓄積**（光技術、異種材料集積技術、テラヘルツ技術、メタマテリアル技術、材料・デバイス技術、評価技術など）を活かし、各々の技術の長期的な戦略と**無線・光融合基盤技術の開発**などの具体的な研究開発課題の設定が必要ではないか。また、研究開発を支援する高価な高周波測定・評価装置の**共用施設**、デバイス・モジュールの作製が可能な**エコシステムの整備、長期的なファンディング**が必要ではないか。
- ② **産業競争力の強化の観点**では、次世代通信システムだけでなく、コンピュータネットワーク、レーダー、センサーなどへの応用も考慮し、**デバイス・モジュールの高性能化、小型化、低消費電力化、低価格化の研究開発**を行うことが必要ではないか。また、**基地局オープン化**によって標準化の活動が以前よりも重要になり、アカデミアからのデバイス・回路などの**革新技术創出とその特許化**で先行し、**国際標準化活動経験のある大学教員、国内企業・コンソーシアムや関係府省と連携した活動**が必要ではないか。
- ③ **国際的に日本の存在感を示すという観点**では、**無線・光融合基盤技術を主軸**に、無線、光、材料、デバイス、回路などの異分野の研究者・技術者が集まる**新たなコミュニティを形成し、新たな学術領域研究を活発化**していくことが効果的ではないか。

© 2021 CRDS | 21


図1-7 検討中の仮説

2 | 無線・光融合が拓く次世代通信技術に対する要求と期待

2.1 無線・光融合が拓く次世代通信技術への要求

寶迫 巖（NICT）

NICTでは今年4月にBeyond 5G研究開発推進ユニットをつくり、Beyond 5Gの研究開発の推進をやろうと新しい部署ができています。その部署ができる前に、Beyond 5G、6Gのホワイトペーパーを出したが、この議論を始めたのは2019年7月からであり1年半程度かかった。ちょうどCOVID-19の影響でオンライン会議が増えていったときであり、オンラインが良かったのかどうかは分からないが、最大150人程度が入って議論できる環境になり、面白く議論を進めたことを記憶している。

社会のビジョンといったところからの話をという依頼だったので、まずはその方向で話をする。未来社会では、趣旨説明の中にもあったように持続可能性、レジリエント、包摂性が重要である。それらを含めるストーリーを一般の人にも分かりやすく解説するために、ホワイトペーパーの中では「サイバネティック・アバター社会」、「月面都市」、「時空を超えて」という名前の3つのシナリオを作っている。このようなシナリオを考えた上で、シナリオの中から現在にバックキャストしたときに、どのような要素技術が必要なのかを考えた。ちょうどCOVID-19が蔓延している頃であり、新規感染症の件も重要だとして取り上げた。地球温暖化によってシベリアの永久凍土が解凍されると、そこから様々なウイルスが出てきて蔓延するのではないとも言われており、決してこれが最後ではない。また、日本では超高齢化社会が進んでいくので、労働人口の減少や高齢者介護というところで社会経済活動へ非常に大きなインパクトがある。それを解決するには、Society5.0で謳われているようにサイバーとフィジカルの融合が重要であり、それを支えるものとしてBeyond 5G/6Gといった通信技術の基盤技術があるという位置づけになっている。

シナリオに書かれている未来社会からバックキャストして要素技術までの議論をしたのが、私どものホワイトペーパーであるが、要素技術の細部まで議論しきれていないところもあり、これらについての議論が重要になってきている状況だと思う。今回は要素技術の部分を深掘りする会議だと思うので、その議論ができればよいと思う。

ホワイトペーパーに書いた要素技術を分けると、図2-1-1に示すように、T1からT7までである。NICTはデバイスそのものよりは若干上のレイヤーのところから攻めているところがあり、必ずしもデバイスのことだけではないが、この中でもデバイスからやらなければいけないことも多くあるので、その議論が進むことに期待したい。

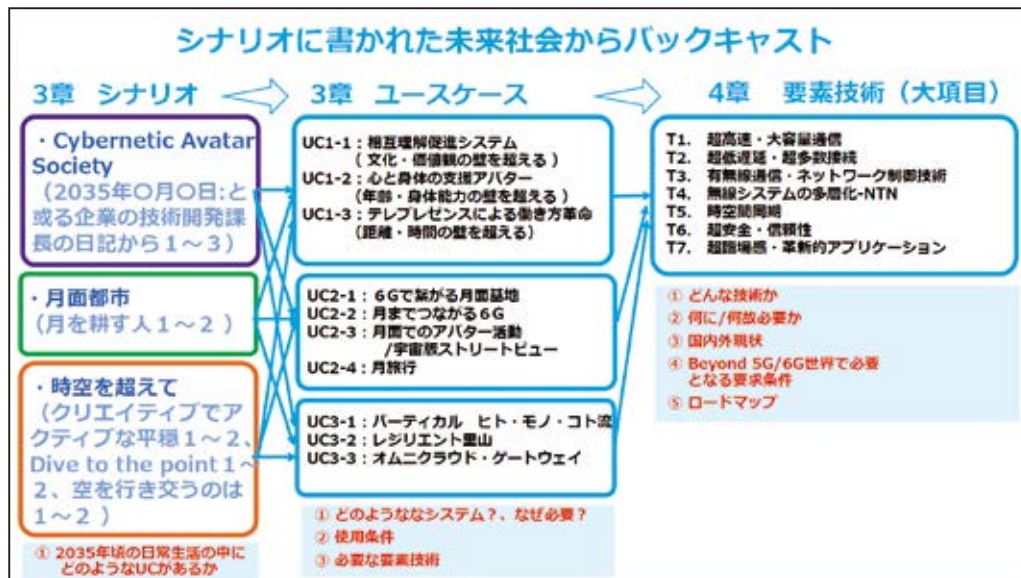


図2-1-1 シナリオに書かれた未来社会からバックキャスト
(令和3年3月NICT「Beyond 5G/6G White Paper」)

シナリオ「サイバネティック・アバター社会 (Cybernetic Avatar Society)」は、リアルもしくは仮想空間の中であって、アバターに乗り移るような形で1人の人が様々なところで活動ができる社会であり、ユースケースに示したようなことができると期待している。

「月面都市」は、近い将来に人類の活動が見込めるところとして月面を設定し、そこで活動を行っていくときに、地球とつなげるためにどのような技術が必要になるかを議論して深掘りしていくために書いたシナリオである。月面には多くの人が住めるわけではないので、アバターロボットのようなものがいて、それを地球上からコントロールするために、どのような遅延を克服する技術が必要なのか議論してきた。

「時空を超えて」は、基本的には地球上でこれまで2次元あるいは平面的に地表に広がってきたネットワークを3次元に拡張していくというシナリオである。空飛ぶ車やドローンのようなものがたくさん飛びまわっている時にどんな技術が必要なのか議論した。それらがぶつからないように高精度な位置情報サービスを導入しなければいけないといったことや、リソースの管理も非常に重要だろうといった意見が出された。

その中のユースケースということで、オムニクラウド・ゲートウェイというものが出た。今までのクラウドサービスは、どこかにクラウドがあってそれに接続して使うというものであるが、これはユーザーの周りにクラウド・ゲートウェイがあり、そのリソースをうまく使ってやることでスケーラブルになる、というものである。そのリソースは、通信のリソース、計算機のリソース、エネルギーのリソースであったりするが、身近にある使えるものから使っていくという考え方であり、今後、重要になっていくと考えられる。

図2-1-2にNICTが考えるBeyond 5Gのビジョンを示している。サイバーフィジカルシステムの中のフィジカル空間 (ハードウェア側) はNICTの研究が進んでいるので、NICTがやっている要素技術を書き込んである。サイバー空間では、サービスのネットワークスライスはどうにつくっていくのかという議論がなされ、それを同時にコントロールするサイバーフィジカル制御プレーンの導入が必須であることも提案された。

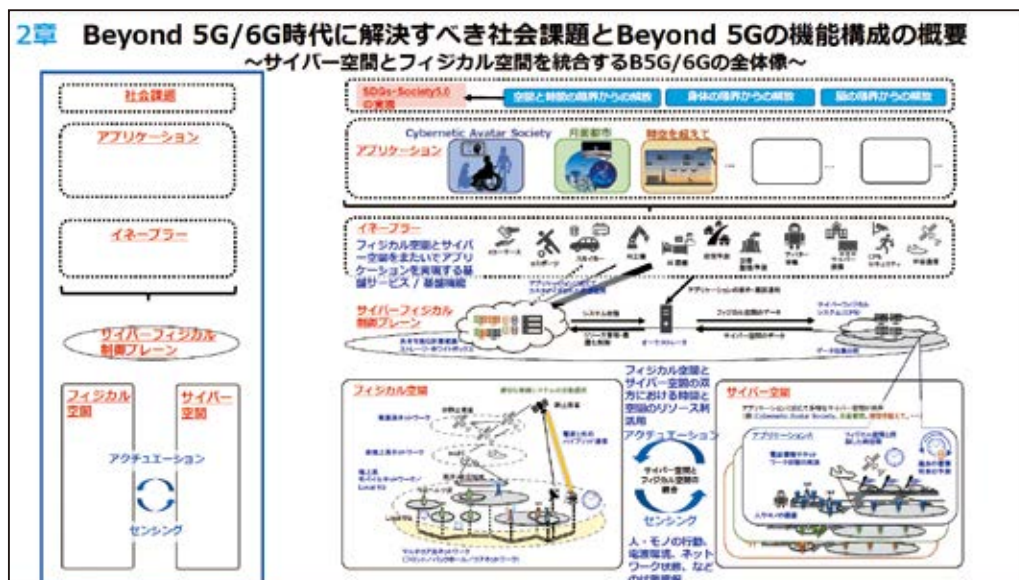


図2-1-2 Beyond 5G/6G 時代に解決すべき社会課題とBeyond 5Gの機能構成の概要
～サイバー空間とフィジカル空間を統合する B5G/6G の全体像～

(令和3年3月 NICT「Beyond 5G/6G White Paper」)

さらに、その上の「イネーブラー」と書かれている部分が重要であり、フィジカルとサイバーをまたいでアプリケーションを実行する基盤的なサービスや基盤機能を見える形で分かりやすく作っていく必要がある。これらを組み合わせて一番上のレイヤーのアプリケーションを実現していくといった階層構造がある。そのようなアプリケーションを通じて、一番上にあるSDGsやSociety5.0などを実現していく形だと思っている。

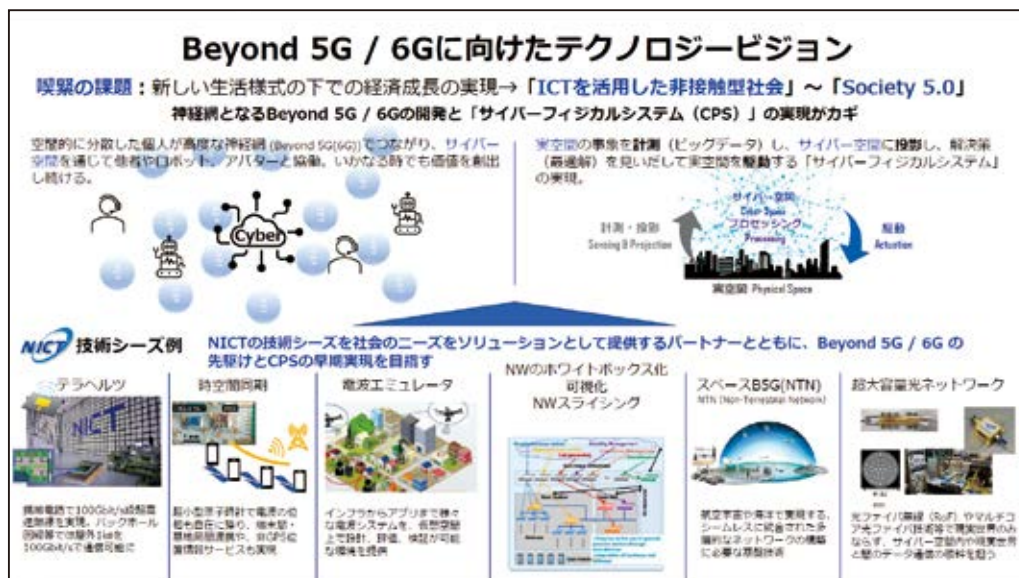


図2-1-3 Beyond 5G/6Gに向けたテクノロジービジョン

図2-1-3に Beyond 5G/6Gに向けたテクノロジービジョンを示す。感染症が今後もある中では、サイバーフィジカルシステムが重要であり、NICTの基盤技術として、テラヘルツ、時空間同期、電波エミュレータ、ネットワークのホワイトボックス化・可視化、ネットワークスライシング、ネットワークの拡張、超高速光ネットワークの拡充が掲げられている。テラヘルツは高い周波数をうまく利用して大容量化に利用したい。光ネットワークの高速化・大容量化のところは、サイバーの基盤になるハードウェア部分なので、しっかりとつくっていくことが重要になる。サイバーとリアルをきちんと繋いでいくコアになる部分であり、この充実を図らないと先ほどの未来社会は実現できない。この性能は可能な限り高くするほうがよいが、エネルギーの制限とどのように両立させるかが重要になってくる。ネットワークの拡張は、3次元的に拡張し海洋や宇宙までも含めてどうやって繋げていくのかということである。これまでもこのようなところにネットワークがなかったわけではないので、そのようなネットワークとどのように整合を取って繋げていくか、特にプロトコルやデータベースのリソース管理などが共通になっていないと繋がらないので、そこをどうするのかをまず議論すべきである。そこから翻って、どのようなデバイスが要するのかという話に繋がってくると思う。

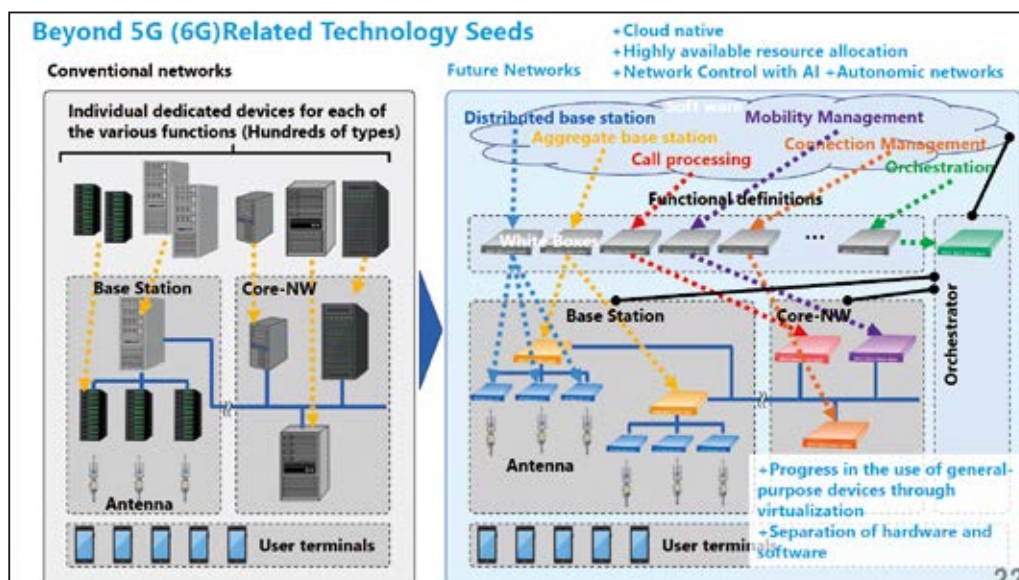


図2-1-4 従来のネットワークと将来のネットワークの構成

(令和3年8月31日「デジタル変革時代の電波政策懇談会 報告書」より引用改変)

図2-1-4に従来のネットワークと将来のネットワークの構成を示す。ネットワークのホワイトボックス化がどんどん進んでいる。図の左側が従来のネットワークを示しており、それぞれ異なる機能を持った機械を寄せ集めてきてシステムをつくっている。これに対し、ホワイトボックス化したものの中では、機能というものをホワイトボックスに対して与えることによってネットワークが構成されることになる。このホワイトボックス化のところで重要な機能がきちんとできるように、ソフトウェアの開発も非常に重要である。このホワイトボックス自身を日本が握れるのかといったところが今後議論になってくると思う。

我々は時空間同期と呼んでいるが、ネットワークの中の同時刻性を格段に上げていく必要がある。同時刻性を格段に上げることによって、例えば身近にあるアンテナというリソースを共有し同調させて上り回線の高速化ができ、GPSがなくてもロケーションサービスを精密にでき、遅延の多いところでもあたかも画像をシンクロしているようにでき、ロボットをシンクロさせるようなこともできるのではないだろうか。その基となる非常に小さな原子時計を開発して、ネットワークの至るところに配置していくといったことが議論されていた。今後、分散型時刻管理ネットワークのようなものが出てくると、原子時計が携帯電話などにも入って、これを稠

密に使っていくことが重要になってくる。

光ネットワークのところではマルチコアファイバーを用いた大容量通信技術が開発されているが、その中でも図2-1-5に示すように受信素子として多素子の受光素子を使った技術を開発している。マルチコアのマルチモードファイバーをある種の散乱体と見なして、実は無線で行われているMIMOのようなことをやっており、このような通信技術の開発が進んでいるところが面白い。

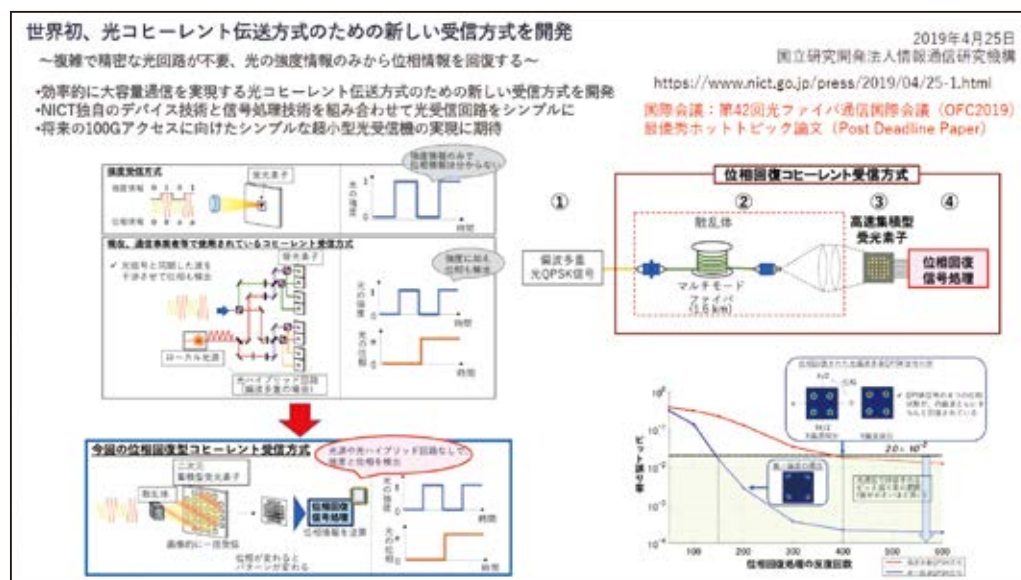


図2-1-5 光コヒーレント伝送方式のための新しい受信方式

シリコンCMOSの性能を上げようとしているDARPAのプロジェクトがある。シリコンデバイスのデジタル性能は微細化によって向上しているが、アナログ性能は40nm世代あたりで頭打ちになっているため、それをさらに高度化しようとしている。それにより、ADコンバータの精度向上、オシレーターの品質向上、フェーズノイズ（位相雑音）の低減につなげ、多くのビームを扱えるようにしようとしている。ミックスドシグナルICの進展に対してインパクトのある重要なプログラムとして注目している。また、このスライドは2016年ぐらいに我々がNICTの中で議論していたものであるが、エレクトロニクスの限界が見えてきたときに、エレクトロニクスの限界を克服するために物理系としてコヒーレントな原子・光系を考え、それを集積化していく技術が今後重要になるのではないかと考えて検討を行ったものである。

現在はBeyond 5Gのビジョンに基づいてコンソーシアムができ、コンソーシアムと連携してBeyond 5Gの研究開発促進事業が行われている。NICTには全体で500億円の補助金が出て、委託研究の助成やテストベッド環境の提供などが行われている。図2-1-6にBeyond 5G研究開発促進事業の課題分布図を示すが、NICTの自主研究に加えて、機能実現型プログラム、国際共同研究型プログラム、シーズ創出型プログラムといったプログラムが行われ、現在の状況として採択件数の総計は44件になっている。その分布をレイヤー別に描くと下位レイヤーのところに集まっているが、これには理由がある。大体4年間のプログラムであるが、後半の2年は総務省の電波利用に移してやらざるを得ないという財源的な仕切りがあり、無線通信やその周辺にまとまるが起こっている。上位レイヤーが抜けているのが今後の課題であり、今後埋めていけるものと思っている。

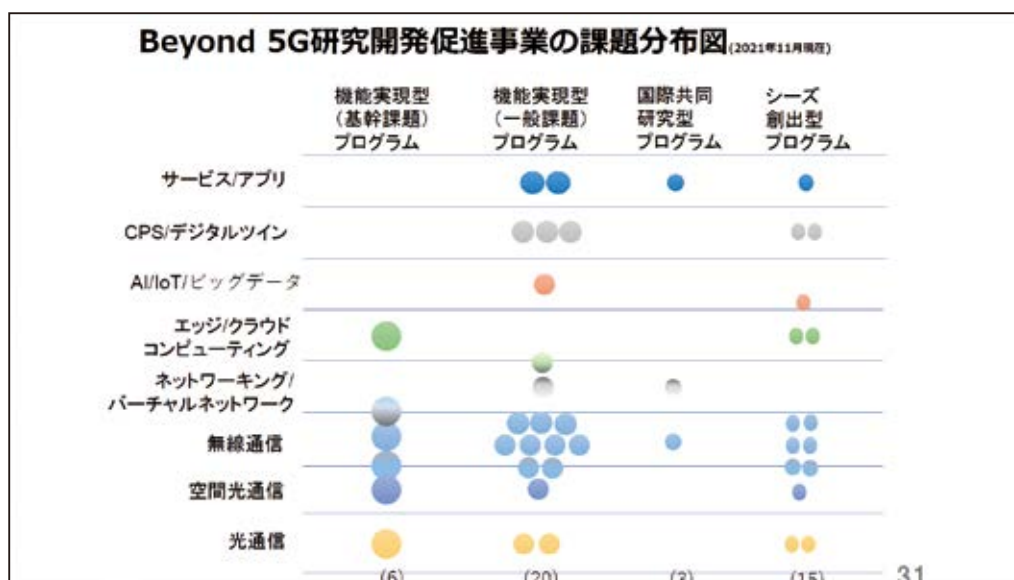


図2-1-6 Beyond 5G研究開発促進事業の課題分布図

（令和3年11月18日情報通信審議会 情報通信技術分科会 技術戦略委員会（第28回）資料28-2 徳田オブザーバー資料より引用）

サービスのテストベッドやプラットフォームについても準備を進めているが、昨年度の補正予算で装置を購入して整備しているところであり、実際に供用できるのはもう少し先になる。

標準化のプロセスはすでに始まっているので、それについていかなければいけないため、NICTでもITU周りのフューチャートレンドやビジョンのリコメンデーションのところに inputs べく準備をしている。

どこに勝ち筋があるのかということについては、NICT内部でディスカッションしている。日本の強み、NICTの強みを分析した上で、どこまで行けるのか考えることが重要だと思う。いかにEMS（電子機器の受託製造）などに作ってもらえるデバイスをつくるかがデバイスレイヤーでは重要だと思う。光デバイスは強いと言われているが本当に戦えるのかといったことも議論になる。また、ホワイトボックスが重要だと述べたが、これ以上のレイヤーは諦めるのか、どうやって入っていくのか、どういう方策が必要なのかといった作戦をみんなで考えなければいけないと思う。今は全く入り込めていないサービスレイヤーをどうするのかも考えることが重要だと思っている。

【質疑応答】

Q：Beyond 5G、6Gで今までになかった欲しいものは何か、あれば教えてほしい。また、光とワイヤレスの融合について、どのような形で2つが接点を持ていくかという点についてコメントをもらいたい。

A：重要なのは、移動通信のネットワークだけではなく、コアネットワークやWi-Fi、衛星のネットワークなどヘテロジニアスなネットワークの相互作用につなげていくかである。それらをつなげるに当たって、特殊な装置が必要なのか、ソフトウェア的、システム的に開発できるのか（多分ソフトウェア的に解決していくと思う）、そこを早めに認識して、丸く収めるような方式などを提案することが重要だ。その流れで光と無線の融合の話も出てきていると思っている。身近な例では、家の中でWi-Fiを使い、外では5Gを使うときに、途切れてしまうところをうまくつなげていくことをBeyond 5G/6Gでやっていくことが重要と思う。

C：ヘテロジニアスということでは、光無線もそうだと思うが、それにより出てくる新たな利便性、機性能性が重要だと理解した。

Q：ミックスドシグナルやベースバンドについて今回は取り上げていないが、この辺の重要性や課題は何か、

日本としてはどうしたらよいのか意見を伺いたい。

- A：NICTでのディスカッションでも、どこを突けばよいかなど様々な意見があり、意見を言い合うことがまずは大切だと思う。それぞれのレイヤーごとにも勝ち方があり、日本の強みもそれぞれにあると思うので、まずはそこを明らかにしないといけない。NICTは情報通信技術の全部をやると宣言しているが、そのような議論を日本全体として一気通貫でできるような場所がなかった。例えば、今回のワークショップを契機にJSTでやってもらおうと非常に面白いと思う。
- Q：原子時計のクロックを使うとマルチビームを出しやすくなるという話があったが、私の理解だとジッターとフェーズノイズとは違う概念である。フェーズノイズはローカル発振器を共通化しておくところを程度抑えられ、ビームフォーミングのマルチビーム化とはあまり関係ないように思う。NICTの中で原子クロックはどのような位置づけなのか。
- A：デバイスの的には、テラヘルツのマルチビームぐらいであれば、恐らく従来の方式を強化した範囲でできると思う。しかし、原子クロックを入れることで、フェーズノイズを下げることでビームをしっかりコントロールできる。さらにデバイスとして手元に乗るようになると様々な利点があるということで、検討を進めている。
- Q：我が国の方向性だけでなく海外を見ながら予算獲得をしていると思うが、我が国の予算は圧倒的に少ない。お金がない中で選択と集中をどうするのか。
- A：お金が少ないのは確かだが、Beyond 5G促進事業の500億円というのは世界の中でも大きい方だと思っている。この中で、特に機能実現型一般課題プログラムは、自由に提案されたものの中から選択していく形になっており、様々な種を拾って国際競争的にも面白い方向性を出していけるとしている。それらが活用されることによって、今後さらに広がっていくと思っている。
- Q：標準化と日本が勝っていくという話は非常に難しいと思う。税金を使ったプロジェクトでは「日本のため」という話になるが、世界中の皆がハッピーになるように持っていくと、結果として日本の産業が儲かると思う。これについてどう思うか。
- A：皆がハッピーになる方向に日本が頑張れば、最終的に日本も含めて皆がハッピーになるというのが最善のやり方だと思う。しかし、そこにどれだけ日本の税金を投入して、その見返りはどうなるのかを厳しく問われると難しい。最後の結果として答えるしかないという政策決定者の覚悟が必要ではないかと思っている。
- C：標準化技術は一番底の技術であり、最終的に実用化する技術なので、ある意味では枯れた技術でよく、そこにあまり注力し過ぎるといけないと思う。研究開発という意味ではフロントエンドの技術を追いつつ、最後に誰かが標準化に入れていくという作業が必要だと思う。

2.2 パーティカルサービス×次世代通信×日本

森川 博之（東京大学）

今後は、制約がない世界がつくられていく。ケーブルの制約、通信接続の制約、端末の制約、場所の制約、物質・空間の制約がなくなる。これは、見えないものが見えるようになる「見える化」、あるいは余分なものを取り除く「見える化」が、全ての産業セグメントで起こることである。その上で、将来的にはデジタルもデザインと絡んでいくような世界ができていく。

では、我々は何をすればよいのか。国の関係では、例えば Beyond5G 推進コンソーシアム、Beyond5G 新経営戦略センター、経産省のポスト5Gや半導体デジタル産業戦略会議、デジタルインフラ整備の会議、総務省も産業政策に取り組むということで総合政策委員会、JEITAのコンソーシアムなど様々なところで考えなくてはならない。どう変わっていくのかがポイントであり、そのために国家プロジェクトがどうあるべきなのかを議論したい。

主観的な話ではあるが、基礎研究とそれ以外の研究とは明確に分けるべきだと思っている。何が当たるかわからないので、基礎研究は広く薄く投資をしていくことが重要である。一方、新たな市場を発掘したり新たなエコシステムをつくり上げたりして事業につなげていくような研究は、圧倒的に顧客価値に深入りしていかなければならない。さもないと、「やっこー」（人工知能系で使われる言葉で、「やってみたら、こうなった」という意味）の研究ばかりになってしまう。これは社会実装等に近くなればなるほど多くなる。

議論を喚起するために問題提起をする。一つの問題はファーストカスタマーがいないということである。「アンカーテナンシー（Anchor tenancy）」という言葉がある。これは宇宙分野で行われている政策で、スペースXはこのアンカーテナンシー契約でやっている。調達先があるかないかはとても重要で、アメリカの場合には軍がファーストカスタマーになることもあるし、政府が調達することもある。これがないと、どんなによいテクノロジーがあっても、起業あるいはスタートアップが産業にまで行きつかない。このハードルが大きい。もちろん世の中には顧客価値に深入りしていない研究もあるが、制度的なものや調達先も考えないといけない。

コミュニティや場のづくり方も課題である。例えばものづくり系では、アメリカの地方大学にきちんとした集まる場を作っている。そのような集まる場のづくり方を学ばないといけない。DARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）のロボティクスチャレンジやスペクトラムチャレンジ、NIST（National Institute of Standards and Technology）のTE（Transactive Energy）チャレンジなどは、非常にうまくデザインされている。例えばロボティクスチャレンジは、ハードだけではなくソフトウェアも重要なので、ハードウェアはボストンダイナミクス1社に作らせ、それをソフトウェアの人たちに使わせた。5G系で言えば、5G-ACIA（The 5G Alliance for Connected Industries and Automation）や5G-AA（5G Automotive Association）というコミュニティが産業界では出来上がっているし、ビッグデータ系で言えばKaggle、ITUのAI/ML in 5G Challengeなどがあり、コミュニティや場のづくり方に対しての一工夫やひとねりが諸外国にはある。

図2-2-1はストークスの4象限を拡張した図である。一番右側が産業につながるものであるが、なかなか右側に行かない。これがなぜかというところを関係者と徹底的に議論している。

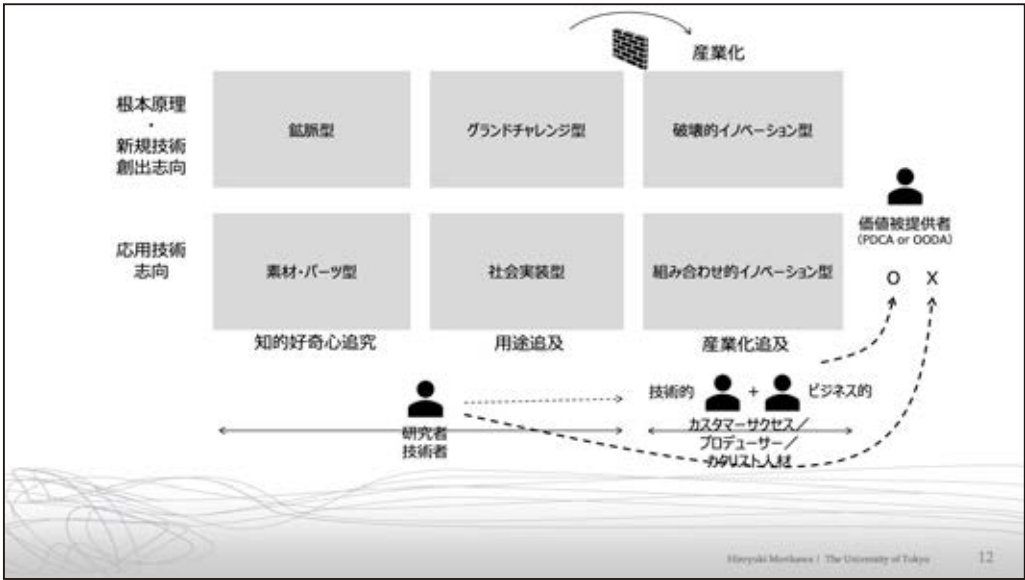


図2-2-1 研究開発のタイプ

ストークスはこれらをボーア型、パスツール型、エジソン型と言っているが、この「用途追及」のところで軍がファーストカスタマーになって、軍でやりながら一番右の民生用につなげていくというのが分かりやすい成功例である。それに対して日本の場合には残念ながらそこがないので、工夫しないと真ん中のところで止まってしまう。どうすればよいのか議論したいところではあるが、私は人材の多様性が重要ではないかと思っている。左側は研究者、技術者であり、右側に行くとカスタマーサクセス人材、プロデューサー人材、あるいはカタリスト人材と呼ばれる人材であり、そのような人たちをもっと入れていかないといけない。

図2-2-2は、R&Dの人たちが言っている言葉とマーケティングの人たちが言っている言葉はこんなに違う、同じ言葉だけれども言っていることが全然違うということを示している。このように様々な人たちが入り込まないと一番右側の産業化には行かないのではないだろうか。テクノロジーはあくまでもツールなので、産業化を本当に考えるなら、それらを組み合わせて価値をつくる人たちの巻き込むことが必要である。

R&D	Marketing
Technical features (what it does)	Consumer benefits
	Target customer and segment
	Size of the business opportunity
How does it work?	Why should the customer believe it will work?
	Why it works better than competition?
What does it cost?	What can I charge for it?
How can it be produced?	When can I sell it?
Is it protected?	How long can I maintain competitive advantage?

Different Languages

Shinya Morikawa | The University of Tokyo 13

図2-2-2 異なる言葉

絵で描くと図2-2-3のようになる。これはテトリスというゲームであるが、このモジュールをクルクル回転させる人が必要である。すばらしい研究者は1つのモジュールを作る。これをクルクル回転させてはめると他のモジュールとぴったり合う。回転させてはめる人が日本には圧倒的に足りない、あるいはそういう人たちのキャリアパスがない。URA（University Research Administrator）などもやられているが、プロフェッサーの下請けのようになっていてインセンティブもない。個人的には、大学や研究所の「長」がつくような人たちは研究者以外の方がよいのではないかと考えている。スタンフォード大でもセンター長はPhDでもない人がやっている。その分野とは全く関係ない30代の方がセンター長をやっていて、50代、60代の偉い先生がプロフェッサーとして所属している。そういうことを意図的にやってもよいのではないだろうか。

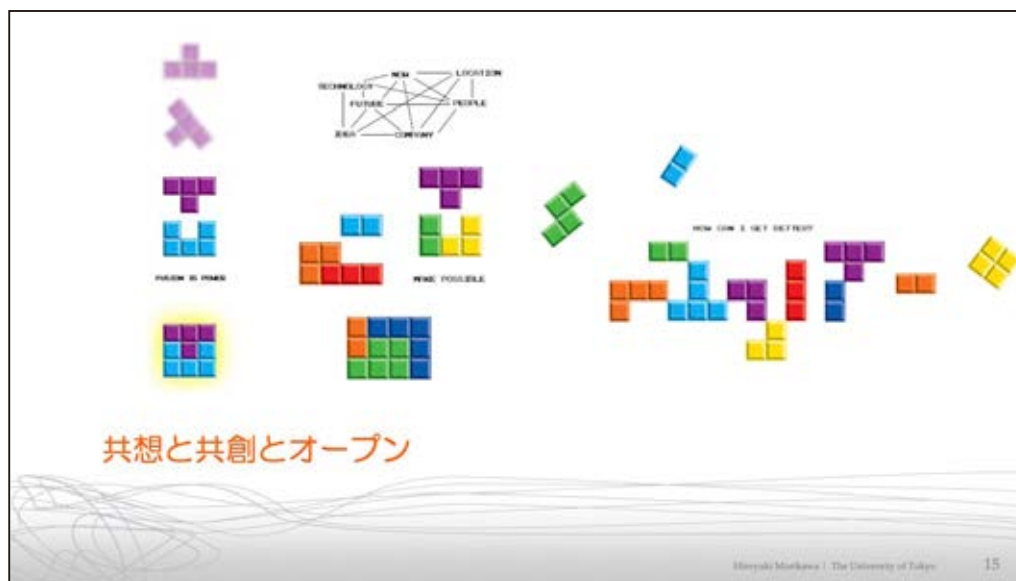


図2-2-3 共想と共創とオープン

Googleのカスタマーサクセスチームのリーダーだった人はそのブログにおいて、カスタマーサクセスチームの人材としては技術に疎い人を採用すると明言している。このような多様性がとても重要だと思っている。世の中では多様性、ダイバーシティ、インクルージョンなどと言われている。純粋な基礎研究であれば必要ないであろうが、コミュニティをつくっていく場合には、研究開発の中でも多様性を考えていかなければならない。

標準化では、研究開発戦略、知財／標準化戦略、事業戦略を三位一体でやらないと「何のためにやっているのか？」ということに必ずなる。5G絡みで徹底的にヒアリングをしているが、ここが外資系企業と日本企業で大きく違うところである。これも隣の芝生が青く見えているのかもしれないが、海外の企業はこの三位一体がうまく、テクノロジーに加えて、事業開発の人も参加してプロジェクトチームをつくって議論している。事業がなかったら何のために標準化するのかということになってしまう。そのためにとにかく議論する、様々な人が交わって議論するのが重要だと思っている。

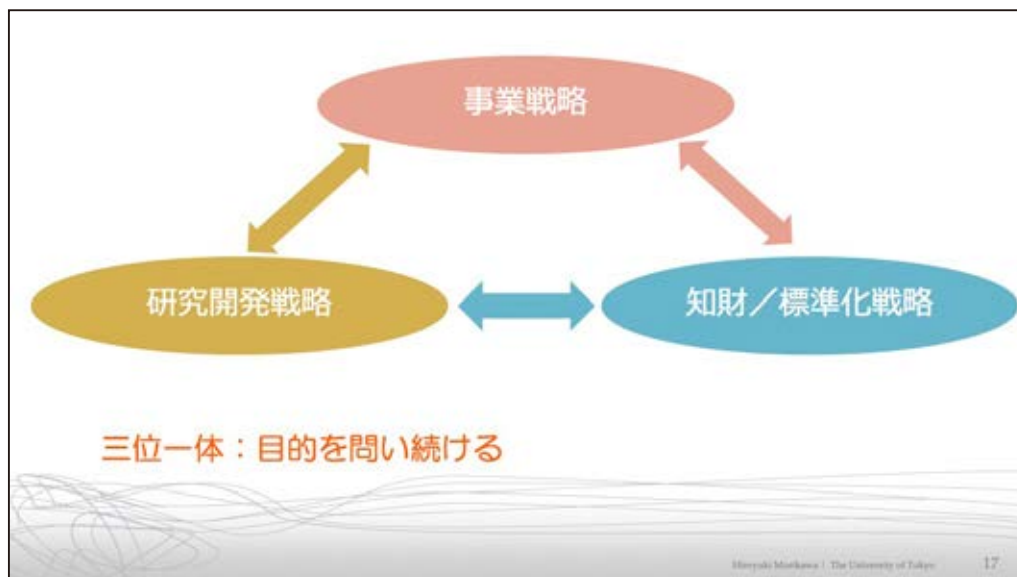


図2-2-4 三位一体

日本のこれからの通信での強みは、ユーザー企業の裾野の広さである。1兆円クラスの企業が膨大にあって、その下に膨大な中堅中小企業があるというのは生かしていきたい。

今回のワークショップは6Gあるいは7Gという先の話であるが、実はそこで勝つためには5.5Gを頑張らないといけない。5.5Gを頑張らないと6Gは駄目になる。5.5Gのような少し先のところにも投資をして存在感を発揮しておかなければ、延長線上の6Gでも勝てない。

【質疑応答】

- Q：なぜ日本で「テトリスを回す」という人材が活躍できないのか。大学で言えば、評価のやり方もあると思うが、URAがより活躍できるためにはどうすればよいのか。
- A：大学の先生が偉過ぎるという問題がある。諸外国に比べて日本では偉過ぎる感じがする。JSTで新しいプログラムを作る際に、「長」とつく人に大学の先生や研究室の人ではない人を持ってくると雰囲気が変わるのではないかな。そのようなことを深く考えていくと、人材の流動性ということも重要になる。
- Q：5.5Gで存在感を発揮するためにやるべきこと、大事なところはどこにあるか。
- A：日本の特徴はミリ波である。もちろん、それ以外にもあると思うが、ミリ波である程度のカバーエリアが実現できると、それは素晴らしい。
- Q：オープンイノベーション機構では、経営をやっていた人をクリエイティブマネジャーにして研究を推進しているが、それでもどの大学も大変苦労している。その理由の1つが、やはり先生が強過ぎてなかなか機構の運営に協力してもらえないケースも多々見られる。雰囲気を変えて、目標ドリブンにしていくにはどうすればよいのか。
- A：事業開発などをやろうとしたときに一番大切なのは、インセンティブ設計だと思う。インセンティブ設計ができる人がうまくビジネスをつくっていく。インセンティブ設計ができれば、大学の先生の協力も得られる。インセンティブ設計ができる人材が重要である。
- C：技術を知らない人を上に持ってくることがうまくいかない理由は、上に来た方が何か変えようとして大学の先生とコンフリクトが起きるケースがほとんどだと思う。
- C：突き詰めていくと、「信頼、共感、利他」に尽きる。皆さんが信頼し合って、共感できて、利他であればうまくいく。こういったところの教育が必要であろう。

- Q：新技術の社会展開には、社会の受容性の問題があると思う。アメリカなどでは取りあえずやってみて、それが今あるルールと少しずれていても許す。例えばWi-Fiなどはガベージバンドと言われるところから始まって、適当にライセンスフリーでやっていたところからスタートしている。日本やヨーロッパでそれをやろうとすると、問題になる。そういう考え方はどうすれば変えていけるのか。
- A：うまく国がサポートしてくれるような分野であれば、国をうまく使うべきだと思う。岩盤規制は撤廃できないかもしれないが、国の人たちもそんなに固くはないので、ガイドラインなどをうまく調整してもらえする場合も多くある。産業界には国をうまく使うという意識が重要だと思う。
- C：2000年の初めぐらいに「イノベーションズ」という本が出て、その副題に「What customers want」とあった。それがイノベーションだということで、企業から大学に移ってこれを教えようと15年間やってきた。しかし、このようなことに共感してくれる大学の先生は日本では1%もいない。ところが、海外では教授自らがcustomers wantを探し、それがうまくいっている先生が10%近くもいる。そういう人材を大学に入れていかなければいけない。まさにそういう人たちのインセンティブ設計をしないといけない。
- C：企業あるいは外の人たちの気持ちが分かる、相手が何を言っているかが分かる、というところに大学の先生が行くと少し変わるのではないか。そのためには人材流動性が必要であり、企業出身の先生がいたり、先生が一旦大学から企業に行って企業を経験してみたりというところから始まると、共感や信頼が生まれ、変化が起きるのではないか。
- C：研究開発と事業計画と知財戦略との整合性の話があった。それぞれにプロの人材が必要であるが、一番重要なのはその3つをつなぐ人たち、つまりファシリテーターやコーディネーターという人たちの役割をもっと認めて、その人たちに一定の権限とインセンティブを供与すると何か変わっていくのではないだろうか。
- C：つなぐ人材というのがインセンティブを設計できる人である。こういう人材は、実は世の中にはたくさんいるのだが、研究や技術とは少し遠いところにいるのが残念な点である。

2.3 遠隔医療・手術ロボットからの次世代通信技術に対する期待

菅野 貴皓（リバーフィールド）

リバーフィールド社は、手術ロボットの研究を長年続けていた東工大発ベンチャーである。まずは、我々が開発している手術ロボットの試作機を紹介したい。すでに量産機に近いバージョンができており、2022年5月頃に薬事申請して、2023年には発売できるところまで来ている。手術ロボットの構成としては、他社製品ではコックピットと呼ばれているサージョンコンソールと手術をするロボット本体であるペイシェントカートからなる。ペイシェントカート本体には、鉗子を操作するためのアームが左手用と右手用の2本、内視鏡カメラを持って動かすためのロボットアームが1本あり、合計3本のアーム構成となっている。サージョンコンソールの前に、執刀医が座って、ロボットを動かすための指示をロボットに送り、その操作指令に応じてロボットが動くという仕組みになっている（図2-3-1）。このような方式はマスター・スレーブ方式と呼ばれ、執刀医が手元のコンソール（マスター）で手を動かすと、手のハンドコントローラーが執刀医の手の動きを計測して、その計測した手の動きに従って、患者の体内に挿入された鉗子等の様々な手術器具（スレーブ）の先端が医師の手と全く同じような動きをするように遠隔操作される。従来の腹腔鏡手術や開腹手術に比べて、フィルターをかけることができるので手ぶれしない。また、従来の手術器具では、腹に突っ込む手術器具として真っ直ぐな棒状の器具しか使えないという操作の制約があったが、我々のロボットの手先には手首関節がついて腹の中で手術器具の先端を自由自在に曲げることができるので、従来の腹腔鏡手術よりもスムーズに手術ができる。我々の手術ロボットには、以上のようなメリットがある。



図2-3-1 リバーフィールド手術ロボット試作機

（左：サージョンコンソール、右：ペイシェントカート）

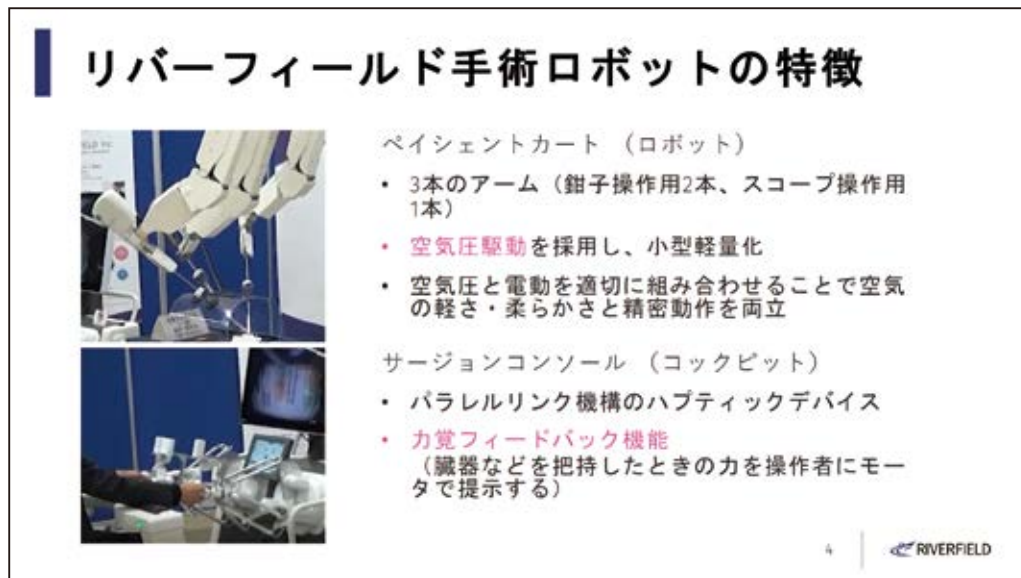


図2-3-2 リバーフィールド手術ロボットの特徴

現在、手術支援ロボットとしては、米国インテュイティブ・サージカル社が開発した内視鏡手術支援ロボット「ダ・ヴィンチ」や日本のメディカロイド社の手術支援ロボット「hinotori」等が製品化されている。それらの製品が電動モーターを採用しているのに対して、我々のロボットは、空気圧駆動を採用していることが一番の特徴である（図2-3-2）。空気圧駆動を電動モーターと比較すると、空気圧アクチュエーターは中が空洞なので小型・軽量化でき、しかも軽いのにハイパワーであるというメリットがある。空気圧駆動は位置決めが難しく、リバーフィールドと東工大で空気圧サーボの研究を続け、バルブや制御理論の最適な組み合わせにより結果実用化が可能になっている。ロボットの根元側の関節については、慣性の影響を強く受けるため現状では空気圧の採用が難しく、電動モーターを採用している。空気圧と電動をうまく組み合わせることで、空気圧の軽さ・柔らかさと電動モーターの精密動作を両立させている。サージョンコンソールには、他社にはない独自の機能として、力覚フィードバック機能を搭載している。これは臓器をつかんだときの力を空気圧で測定して、そのつかんだ力をサージョンコンソールのハンドコントローラーについているモーターを使って操作者に提示する機能である。つまり、遠隔で執刀医が臓器をつかむと、そのつかんだ力が執刀医に触覚として返ってくるので、あたかも自分自身の手で臓器をダイレクトにつまんでいるかのような感覚を得ながら手術をすることができる。以上が、我々のロボットの特徴である。

ここから本題の遠隔手術の話に移る。遠隔手術に関するプロジェクトには、図2-3-3に示すように2つのパターンがある。1つ目のプロジェクトは、我々が取り組んでいるような「手術ロボットを通信網を介して遠隔操作する」方法を採用するプロジェクトである。離れた所（例えば、地方の病院等、医師不足に悩んでいるような所）にいる患者をエキスパートの執刀医が遠隔手術をするやり方である。患者の近くには、ロボットに何かあったときに緊急対応ができる（簡単な手術手技ができる）スキルを持った助手がいて、遠隔地にいるエキスパートの医師（あるいは忙しくて田舎の病院に出張できない医師）をサポートする。これが、遠隔手術プロジェクトの概要である。もう一つのプロジェクトは、「遠隔手術支援（指導）」プロジェクトである。前述の遠隔手術プロジェクトと違って、従来の（ネットワークを介さない）ロボット手術、あるいはロボットを使わずに従来の腹腔鏡手術や開腹手術を行うものであるが、手術の際には、遠隔地にいる指導者が内視鏡カメラの映像等を見ながら、絵や音声を使って執刀医に直接指示をすることで、若手の執刀医を遠隔で教育（手術指導）するコンセプトである。

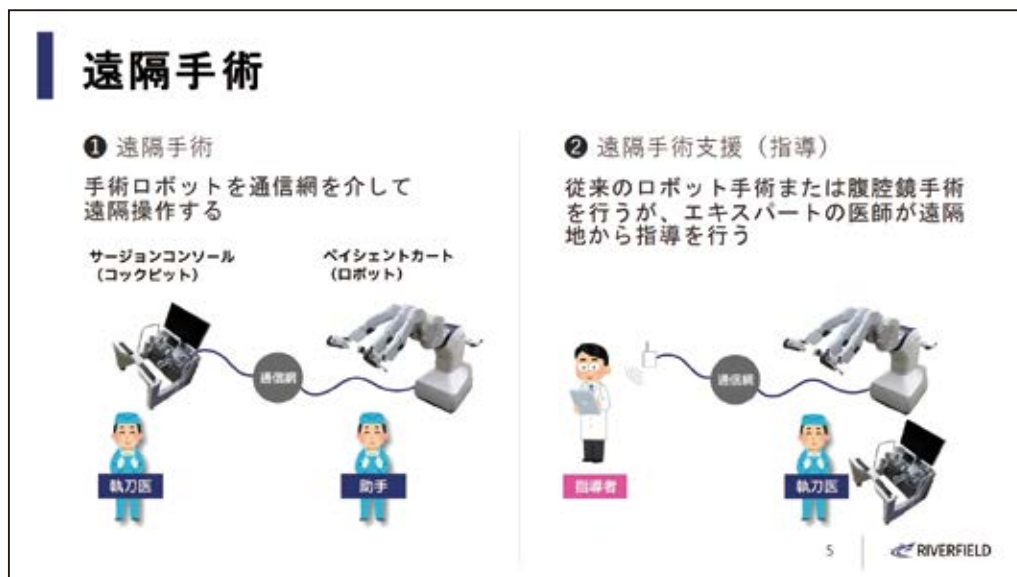


図2-3-3 遠隔手術に関する2系統のプロジェクト

遠隔手術の基礎研究はかなり昔から行われている。2001年9月にリンドバーク手術と呼ばれている世界初の遠隔手術実験が行われた（J. Marescaux et al., Nature Vol. 413, p. 379-380, 2001.）。米国ニューヨークの外科医チームが、大西洋を越え6000 km以上離れた仏ストラスブールにいる患者の胆嚢を摘出した有名な遠隔手術（ATM通信 / 10 Mbps / 遅延155 ms）である。その後、2003年にカナダでは、大規模な臨床実験として、400 km以上離れた病院の22名の患者さんに対して遠隔手術（IP / VPN / 15 Mbps / 遅延135-140 ms）が行われた。また、国内でもかなり昔から動物を使った研究が進められており、国内で有名なものでは、九大・橋爪誠教授や東大・光石衛教授のグループが中心になって2006年～2008年に行われた日本-タイ遠隔手術実験（ブタの腹腔鏡下胆嚢摘出手術）の事例（専用回線 JGNII / 10.3 Mbps：制御遅延6.5 ms / 映像系遅延435 ms）等が報告されている。

もともと遠隔手術を先導していたのはアメリカ国防高等研究計画局（DARPA）である。戦場で兵士が怪我をしたときに外科医が安全な所から手術をする目的で、90年代に実証実験が行われている。結局実用化されることはなかったが、DARPAからスピンアウトしたインテュイティブ・サージカル社により内視鏡手術支援ロボット「ダ・ヴィンチ」が開発され、ネットワーク越しの遠隔機能を手術室の中で操作をするというものであるが、かなり有効性が高いということで、今では世界で4,000台程度導入されている状況である。

我々が関わっているのは、2020年度から立ち上がったAMED「高度遠隔医療ネットワーク研究事業」という日本外科学会が統括するプロジェクト（研究開発課題名：手術支援ロボットを用いた遠隔手術のガイドライン策定に向けた実証研究）である。このプロジェクトの研究チーム編成はかなり大規模であり、九州大学・弘前大学・北海道大学の医学部の外科医師が中心になっている研究グループと、その下に我々リバーフィールド社と、国産第1号手術ロボットを造られたメディカロイド社、通信回線を提供するNTT東日本、遠隔で映像を伝送するシステム等の開発を行っているソリトンシステムズ社が参画している。

遠隔手術の実現に向けた国内の動向を図2-3-4に示す。遠隔手術の実用化を推進したい医師からの熱意ある働きかけが功を奏し、厚労省の検討会で遠隔手術を解禁する方針が決まった。その後、国からトップダウンで遠隔手術に関するプロジェクト研究として2020年にAMEDの公募が始まり、本格的に研究がスタートしている。

AMEDプロジェクトほか		国内全体	
2019. 6	厚労省検討会にて遠隔手術解禁の方向性が決まる	2020. 1	ドコモ「モバイルSCOT」コンセプト公開
2020. 2	AMED令和2年度「高度遠隔医療ネットワーク研究事業」公募開始	2020. 7	モバイルSCOT実証実験開始
2020. 6	プロジェクト採択・研究スタート		
2020. 8-12	疑似遠隔環境での遅延評価実験	2021. 4	メディカロイド・ドコモ 5G遠隔操作実証実験
2021. 2	弘前-むつ遠隔手術実験		
2021. 7	北海道-九州遠隔手術実験（メディカロイド）		
2021. 9	札幌-釧路遠隔手術実験		
2021. 10	弘前-十和田遠隔手術実験		
2022. 3	遠隔手術のガイドライン策定（予定）		

図2-3-4 遠隔手術の実現に向けた国内の動向

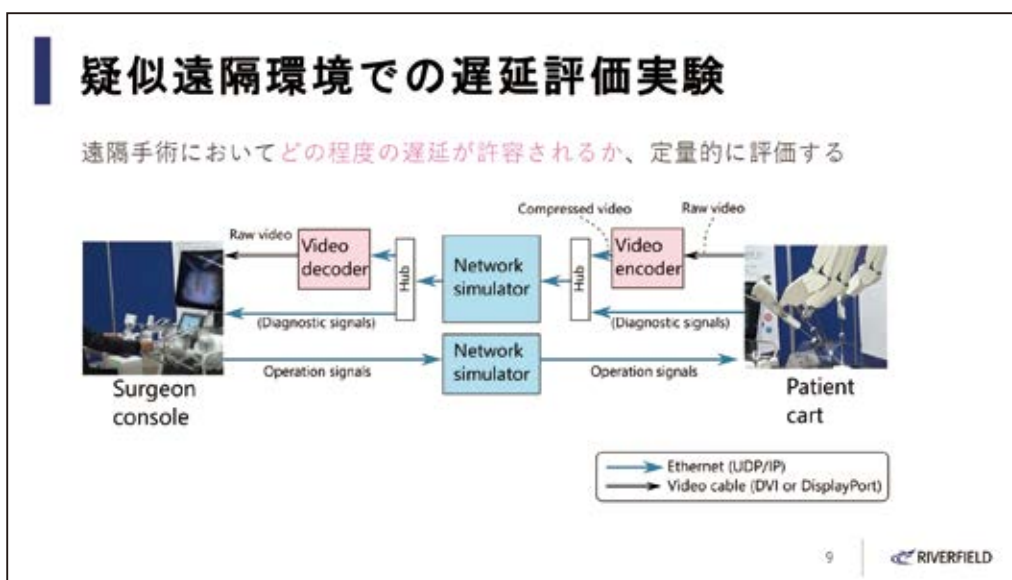


図2-3-5 疑似遠隔環境での遅延評価実験

我々は、まず疑似遠隔環境として、ネットワークシミュレーターを使って定量的に通信の遅延がどれくらい影響を与えるのか評価した後に、実際に遠隔でつないで手術をするという実証実験を何度か行っている（図2-3-5）。本プロジェクトのゴールは、2022年3月に遠隔手術のガイドラインを策定することである。このガイドラインの策定が無事にできると、企業は遠隔手術を製品に積んでもよいことになる。一方、このプロジェクトとは別に動いているのが、NTTドコモと東京女子医科大学が中心になって進めている「モバイルSCOT」というものである。これは前述した2番目の遠隔手術支援プロジェクトの方になるが、トラックの中にスマート治療室（SCOT：Smart Cyber Operating Theater）があり、そこで執刀医が手術するのを戦略デスクというものを通じて遠隔地にいるエキスパート医師が指示したり、手術戦略を立てたりする。このようなコンセプトが公開されて、2021年に入って様々な実証実験が始まっている。また、メディカロイド社はAMEDのプロジェクトだけではなく、独自に5Gを使って手術ロボットを遠隔操作する実証実験も実施している。

以下で我々の実証実験とその結果を簡単に紹介する。遠隔手術において、どの程度の遅延が許容されるか

を、サージョンコンソールとペイシェントカートをネットワークシミュレーターを挟んでつなぎ、人工的に遅延をつくって実証実験を行い、定量的に評価している。鉗子を使ってペグを移動させる簡単なタスクをやってもらった結果、通信の遅延が長くなるほどタスクを完了するための所要時間が延びるという結果が出ている。また、「遅延0 msの初心者」と「遅延100 msのエキスパート」が同程度のパフォーマンスが得られ、遅延100 ms以内では遠隔手術をエキスパートが行った方が有効であることが分かった。その後、弘前大学附属病院から直線距離で150 km程度離れているむつ総合病院を結んで遠隔手術の実証実験を行った。むつ総合病院がある青森県むつ市は陸の孤島と呼ばれており、車で4時間以上かかる離れた所である。このような都道府県の中で閉じた遠隔手術は有効に使えるのではないかと医師からコメントを頂いている。

NTTから帯域保証されたギャランティ回線と、普通のベストエフォート回線を使って実験を行った。いずれの回線も青森県で通信がかなり空いているということで、ギャランティ回線で2 ms、ベストエフォート回線で8 msという超短遅延を実現している。その結果、回線速度が変わっても、あまり手術タスクに影響はなかったという結果が得られた。

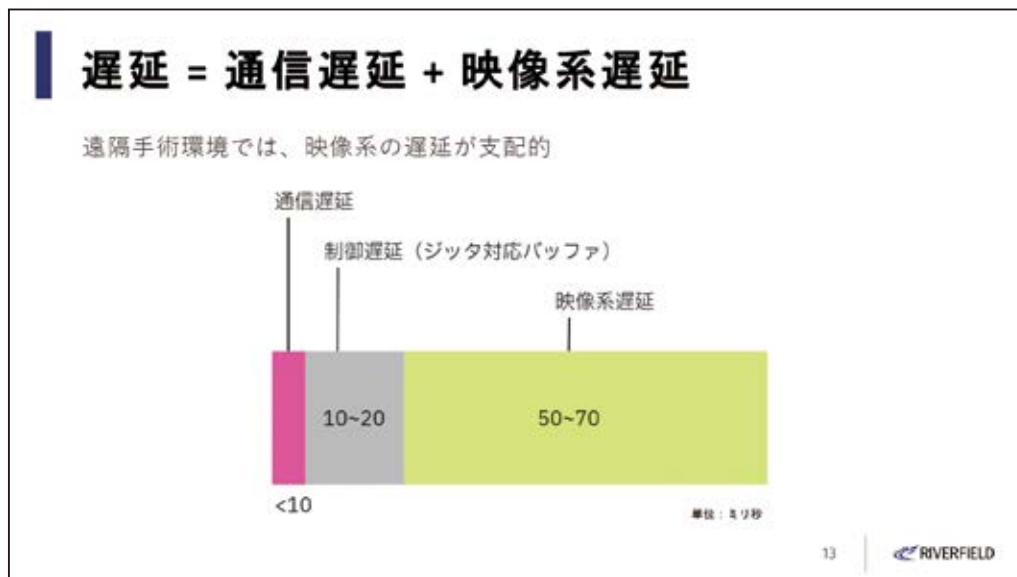


図2-3-6 遠隔手術環境における遅延（＝通信遅延＋制御遅延＋映像系遅延）

遠隔手術の環境として、図2-3-6に示すように、通信の遅延が10 ms以内に抑えられているので、映像処理の遅延のほうが支配的になっているのが現状である。今回ソリトンシステムズ社の超短遅延エンコーダ（5G対応の超短遅延ライブ中継機Zao-SH）を使うことで、50～70 ms（トータルで見ると100 ms）程度に遅延が抑えられている。従来の映像処理システムでは1フレーム分のデータが揃ってから次の処理を行うために、圧縮して送ってデコードすることをフレーム単位でやっていたので、かなり遅延が出ていた。しかし、この超短遅延エンコーダを使うと、1フレーム分のデータが揃うのを待たず細分化された画像単位ごとに逐次処理するので、かなり遅延を抑えることができています。

通信遅延の影響①

全ての遅延は操作者（医師）の操作感に影響する

超短遅延エンコーダにより数十ミリ秒という低遅延を実現しているが、さらなる低遅延化のためには内視鏡からディスプレイまでのトータルシステムでの開発が必要

超高速回線が実現すれば非圧縮での映像伝送が可能になる

通信遅延はロボットの性能や安定性にも影響する

力覚フィードバックなし：

- ・遅延時間に関わらず安定に動作する

力覚フィードバックあり（NW越しに制御の閉ループが存在する）：

- ・力のフィードバックを下げる必要あり → 操作者が力を感じにくくなる
- ・ロボットの位置制御のゲインを下げる必要あり → 動作精度が悪くなる

15 RIVERFIELD

図2-3-7 遠隔手術に及ぼす通信遅延の影響（その1）

通信遅延の影響②

本プロジェクトでは地方の光回線を使用したため遅延・ジッタともに小さかったが、以下のような環境では遅延やジッタが増大する

- ・無線通信を用いる場合
- ・都市部などでネットワーク経路が複雑になる場合

ジッタの軽減も以下の理由から重要となる

- ・ロボット側にバッファを設けてパケットを時系列に並べ直す必要がある
- ・バッファをジッタの最悪値に合わせて設計するため、遅延の平均が短くてもロボットの制御性能は遅延の最大値によって決まってしまう

16 RIVERFIELD

図2-3-8 遠隔手術に及ぼす通信遅延の影響（その2）

図2-3-7および図2-3-8に遠隔手術に及ぼす通信遅延の影響を示す。全ての遅延は操作者の操作感に影響することを考えれば、数十msよりさらに低遅延化して、より執刀医が滑らかに手術できるようにする必要があると考えている。また、映像遅延は問題ないが、通信自体の遅延があるとロボットの性能や安定性にも影響してくる。力覚フィードバックがなければ問題ないが、力覚フィードバックがある手術ロボットにおいては、ネットワーク越しに制御の閉ループが存在するので、遅延が長くなればなるほど力覚フィードバックの感度を下げるか、あるいはロボットの位置制御のゲインを下げて、ロボットの位置決め精度を犠牲にするという対策が必要になってくる（図2-3-7）。

本プロジェクトの実証実験は青森県の光回線の環境が非常に良い所で行ったので、遅延は少なかった。しかし、無線通信を導入する場合や東京等で行う場合には、遅延やジッタ（遅延時間のゆらぎ）が増大する可能性があり、ジッタの軽減がかなり重要になってくる。ジッタがあるとロボットにバッファを設けて、パケットの入れ替わり等があったものを受信側で時系列順に並べ直す必要が出てくる。そうすると、バッファをジッタ

の最悪値に合わせて設計しなくてはならないので、ジッタの影響はロボットの性能にかなり影響を及ぼすことになる（図2-3-8）。

以上をまとめると、次世代の通信技術に対しては、遅延の平均だけではなくジッタも軽減できる技術が必要である。将来的には4K・8K映像に対応し、かつ地方の病院でも採算が取れる帯域保証回線が重要になる。また、安全性を保障するために無線やクラウドの様々な技術が必要になる。例えば、無線で遠隔手術をしようとする、妨害電波を飛ばすような物理的なサイバー攻撃が可能なので、そのような攻撃に対応できる技術が必要になる。

【質疑応答】

Q：力覚のフィードバックで遅延等があると問題になるとのことだったが、具体的には、力覚は100 ms以内であればよいのか、それともさらに短い遅延が必要なのか。

A：力覚フィードバックの安定性は、主に通信の遅延のところで効いている。力覚情報は映像と違ってほぼリアルタイムで飛ばすことができるので、実質的には通信遅延だけで決まってくる。我々リバーフィールド社で調べたところ、20 ms以内ではロボットの動作に支障は出ていない。今後、よりシャープな力覚フィードバックを返すために、さらに遅延を小さくしたいと考えている。10 ms程度であれば問題ないと思うが、やはりジッタを軽減するところが大事になってくる。私は博士課程まで通信の遅延に対して力覚フィードバックする制御系の研究をしていたが、遅延が長くなれば力覚を弱めるかロボットの動作性能を落とすしかないと思う。

Q：力覚を弱めないといけなくすると、やはり手術の危険度が上がってしまう可能性もある。その意味では、通信の性能はできるだけ高いほうがよいのではないか。

A：その通りであり、力覚フィードバックの点からは通信自体の性能を上げていきたいと考えている。ただし、現状のダ・ヴィンチなどは力覚機能がなくてもほとんど事故もなく手術ができていますので、医師からは映像系の遅延を減らしたいという要望が多いのが現状である。エンジニアとしては、やはり力覚を究めたいところではある。

Q：紹介された新しい超短遅延エンコーダ（5G対応の超短遅延ライブ中継機Zao-SH）では、画像処理の遅延はどの程度あるのか。

A：50～70 ms程度である。

Q：遅延をもっと縮められるとよいと思うが可能なものか。

A：従来のエンコーダを使うと、100 ms、200 ms程度の遅れが出てしまう。これでもかなり縮められている方ではあるが、さらに縮めたいという現場の要望がある。究極的には、超高速回線を使って非圧縮で伝送するのが一番よいと思う。

Q：実験では専用回線ではなく公衆回線を使っているのか。

A：片方は公衆回線のVPN環境で8 msが実現できている。

Q：その意味では圧縮や復調・変調、ルーティングのEA（End point Address）も含めて、通信性能はこの程度で十分ということなのか。

A：その通りで、Ping値（ネットワーク通信における往復時間）で8 msであれば十分である。映像はフルHDである。

Q：画像を撮るという意味においては、高速のCMOSイメージャーを使うとよいと思うが、コストが高くなるので不可ということになるのか。また、デバイスの性能を上げていくことは可能だと思うが、どのように考えているのか。

A：もちろん高速のCMOSを使った画像技術は重要になってくる。しかし、今回は市販の内視鏡と市販のディスプレイを使った。専用の機械を使っているのは、エンコーダ、デコーダ、映像の圧縮・伸長のと

ころだけである。カメラ内部やディスプレイの内部処理等のバッファに一旦映像を溜めるので、そこでの遅延がどうしても起きてしまう。そこを低減できるような低遅延内視鏡は将来的に必要なと思う。

Q：まだ非圧縮での実験は行っていないのか。

A：非圧縮で伝送しようとするすると1Gbpsを超えてしまうので、まだ実現できていない。

C：無線と有線の融合が進めばそのような手立ては出てくると思うので、是非8Kの非圧縮での実験をやってもらいたい。

C：8Kの非圧縮だと10Gbps以上必要になってくるが、それが実現できれば非常に有難い。

Q：全く別の観点からの質問だが、遠隔手術ロボットでトラブルが起きたときに誰が責任を取るのか。このような議論はどの程度進んでいるのか。

A：実は、それもかなり大きなテーマとなっている。プロジェクトチームの中に、安全性や責任の所在等を議論している医師主導のチームもある。今は、責任よりとにかく事故が起きないように運用の仕方を考えている。ガイドラインとしては、遠隔手術する際には、ロボットに支障が生じたときに備えて、ロボットを患者から離して普通の手術が緊急に行える医師をロボットの近くに必ず待機させておく方向で、ガイドラインの策定が進められている。その意味では、遠隔手術ロボットは本当に役に立つのか、患者の近くに医師がいるのにわざわざ遠隔でやる必要があるのか、という議論があるのも事実である。

3 | 次世代通信の技術展望とコンソーシアムの取組

3.1 6Gの進化の方向性

須山 聡（NTTドコモ）

「6Gの進化の方向性」について、NTTドコモの取り組みを紹介する。

まず、6Gでは5G evolutionの観点も大切であるという森川先生の意見と同意見である。5G開発経緯と6Gスケジュール展望については、図3-1-1に示す通りである。5Gでは、2010年頃から準備を開始し、2014年にホワイトペーパーを公開し、実証実験、標準化を経て、2020年に商用化にこぎ着けた。この中で、2015年頃から4Gのサービスと平行して5Gの実証実験を始めた。日本は、今まさに5G evolutionと6Gに積極的に取り組まないと、国際的なプレゼンスを保つことが非常に難しくなる時期にきている。

6Gスケジュールは、5Gと比べて非常に早く進んでおり、2020年にホワイトペーパーを公開した点から考えると、サービスインの時期は、議論中だが5Gの時よりも早い可能性がある。国内のBeyond 5Gコンソーシアムや米国のNext G Allianceといった団体も設立され、学会でも議論が活発に行われている。また、日本では大阪万博が1つのマイルストーンになり、そこで6Gをアピールしていくことが重要である。

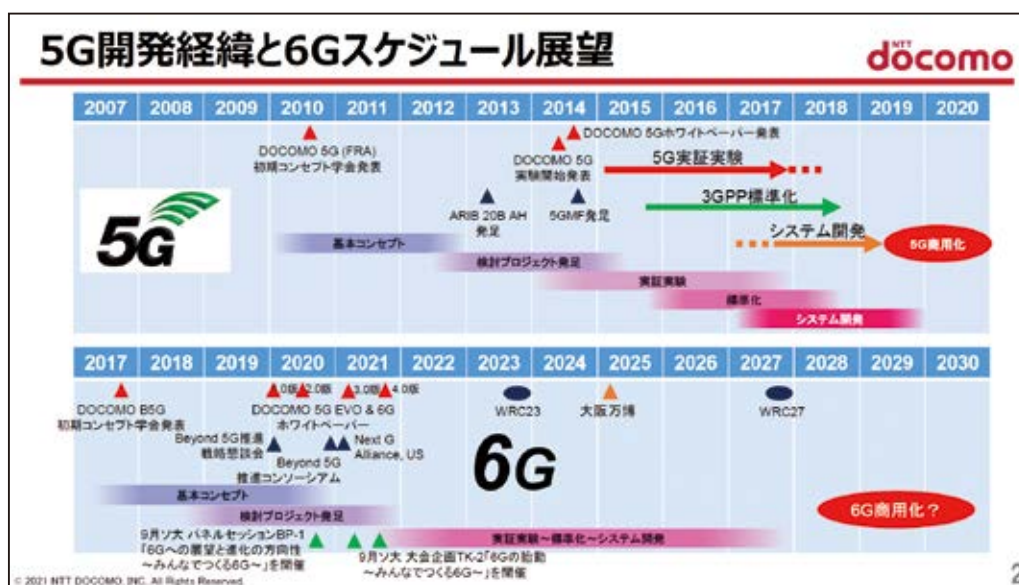


図3-1-1 5G開発経緯と6Gスケジュール展望

5G evolution & 6Gに向けた方向性としては、図3-1-2に示した6つのコンポーネントを目指して取り組んでいる。また、本日のワークショップの題目である「無線・光融合」については、無線技術と光技術とのコラボレーションという点も含めて議論が行われており、NTTドコモはNTTグループとして、「IOWN」の超大容量・超低遅延・超低消費電力の特徴を組み合わせ、「5G evolution & 6G powered by IOWN」というキーワードで、今後、無線と光のコラボレーションの効果を最大化する方向で研究開発を進める（図3-1-3）。NTTドコモのホワイトペーパー「5Gの高度化と6G」については、2021年11月8日に4.0版に更新し、「IOWNとの融合による更なる高度化の方向性」のエッセンスを記載した。今後、IOWNとの融合について、内容を

充実させていきたいと考えている。その他の更新内容は、3GPPでのRelease 17及び18の最新の標準化動向、6Gが提供する価値や6G時代に注目する無線技術以外の技術・ユースケース等についてである。

図3-1-4に示した5G evolution & 6G進化の方向性については、ここでは説明を省略するが、社会課題解決は当然として、ユースケースは非常に重要だと考える。5G evolution & 6Gのコンセプト映像で、以下の内容が紹介された。(映像の説明は省略)

- ・ 実世界の全ての情報がサイバー空間とつながる「サイバー・フィジカル融合」
- ・ 6Gの特徴（超高速・大容量通信、超低遅延、超カバレッジ拡張、超高信頼通信、超低消費電力・低コスト化、超多接続&センシング）



図3-1-2 5G evolution & 6Gに向けた方向性



図3-1-3 5G evolution & 6G powered by IOWN



図3-1-4 5G evolution & 6G 進化の方向性

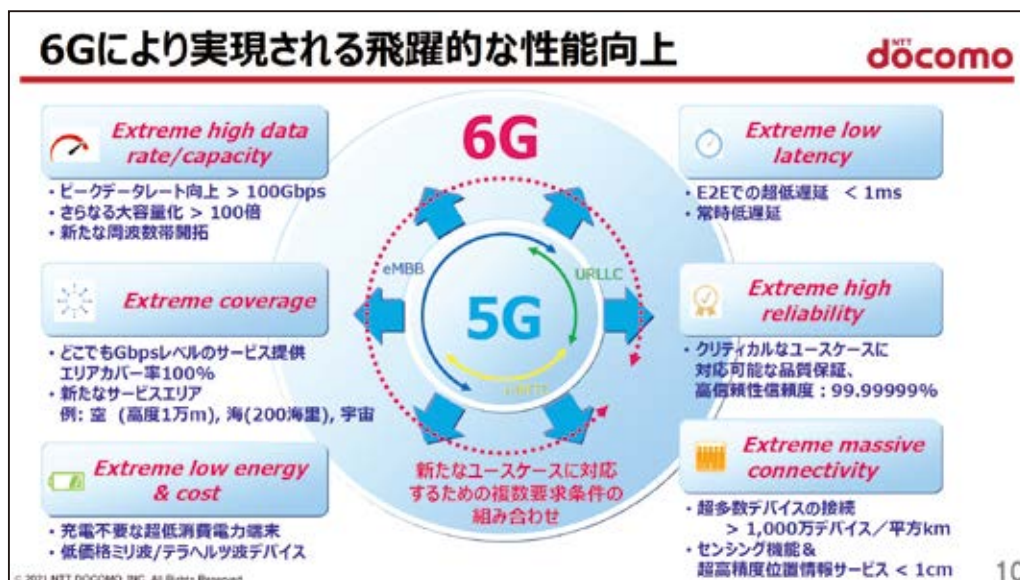


図3-1-5 6Gにより実現される飛躍的な性能向上

図3-1-5に示す6Gにより実現される飛躍的な性能向上について、6Gの特徴である6つのコンポーネントについて説明する。

- ・超高速・大容量通信：ピークデータレート100Gbps以上、100倍以上の超大容量化を狙っている。
- ・超カバレッジ拡張：現在の移動通信システムがカバーしていない空・海・宇宙などを含む超カバレッジを実現していく。
- ・超低消費電力・低コスト化：エナジー・ハーベスティング（無線での給電技術）やバックスキャット通信などの活用も考えている。
- ・超低遅延：エンド・トゥ・エンドで1ms以下程度、IOWNとの組合せも非常に重要になると考えている。
- ・超高信頼通信：セブンナインの信頼度（99.99999%）を目指す。5Gの高信頼・低遅延通信（URLLC：Ultra-Reliable and Low Latency）よりも、さらにレベルの高い信頼性やセキュリティを目指す。
- ・超多接続&センシング：今後、非常に重要なポイントになってくると考えている。

次に、図3-1-6に示す5G evolution & 6Gの8つの要素技術について説明する。詳細については、ホワイトペーパーを参照して頂きたい。

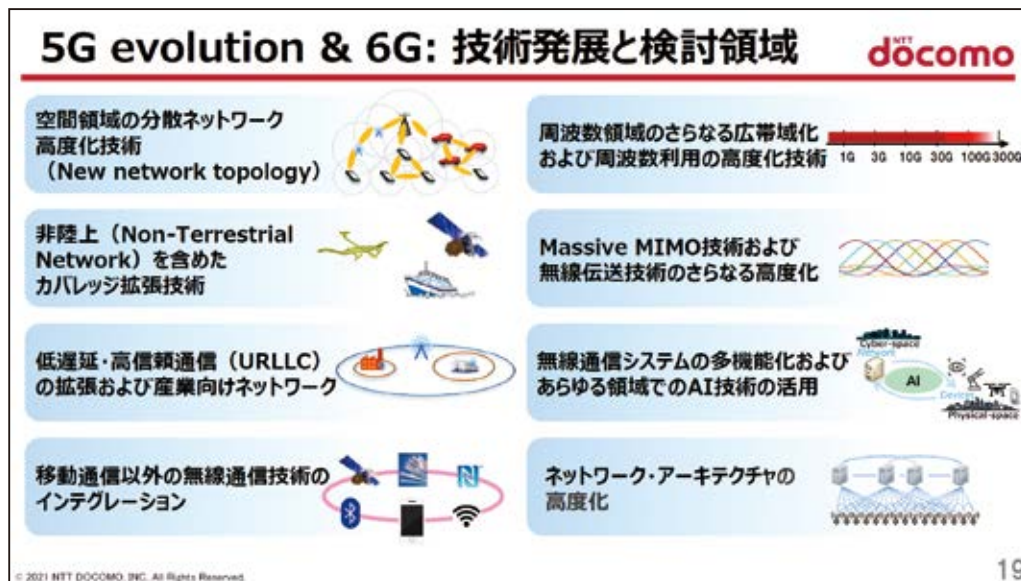


図3-1-6 5G evolution & 6G: 技術発展と検討領域

• 分散ネットワーク高度化 (New Radio Network Topology)

従来、無線基地局の無線セルはお互いの干渉が起らないように規則的に配置されていたが、今後は高密度で干渉が発生してもよい配置で干渉をコーディネーションする方向である。これは、セルフリーMIMOの考え方とも合う方向になっている。また、非常に多くの基地局を配置するには、相当なコストが必要となるため、従来型の基地局アンテナを用いないソリューションが重要になる。例えば、街灯など既存オブジェクトをアンテナとして利用する方法や、反射板技術 (RIS: Reconfigurable Intelligent Surface)、ROF (Radio on Fiber)、誘電体導波路など、コストを抑えて基地局を増やすソリューションが非常に重要だと考える。また、無線中継技術も重要である。これらを組み合わせて、ユーザーに適した高度なネットワークを構築していくことが重要であると考えている。NTTドコモでも、メタマテリアルを使った反射板や、メタサーフェイスレンズを用いた実験を進めており、報道発表している。

• 6Gに向けた周波数の開拓

6Gの周波数帯としては、図3-1-7に示すようにミリ波、サブテラヘルツ波、テラヘルツ波があるが、サブテラヘルツ波が6Gならではのバンドの1つになるのではないかと考えている。ただ、テラヘルツだけを考えればよいという話ではなく、ローバンドやミッドバンドと呼ばれる、10GHzから20GHzまでのバンドを6Gで活用していくことも重要である。さらに低いバンドについても6Gのテクノロジーを導入することにより、増大するトラフィックに対する容量逼迫を改善して、低コスト、低エネルギーでサービスを提供することも非常に重要なポイントだと考えている。

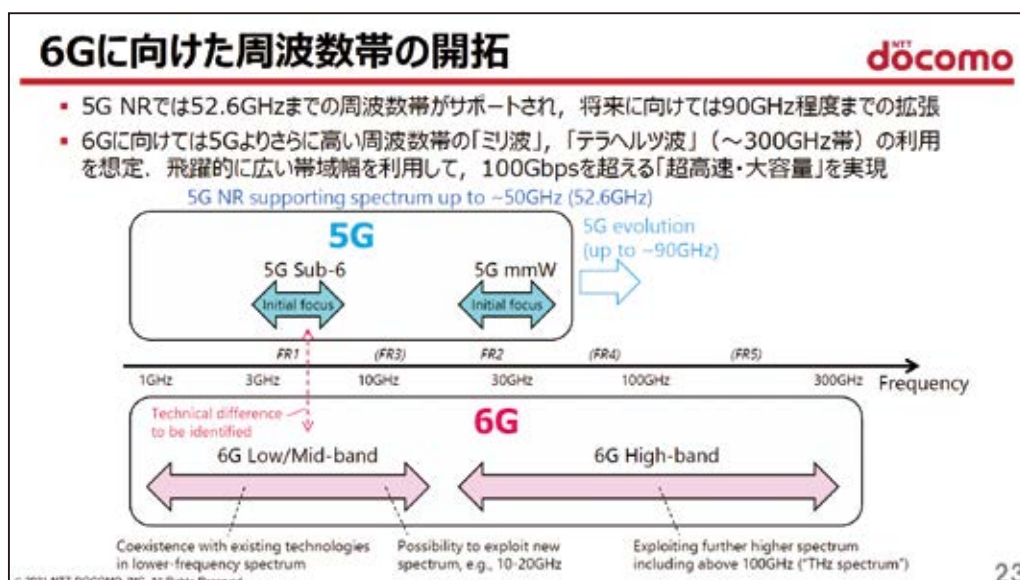


図3-1-7 6Gに向けた周波数の開拓

・高周波数帯無線デバイス技術の技術課題

ここでの技術課題を図3-1-8に示す。テラヘルツについては、電波伝搬をきちんと把握することと、最終的にユーザーは端末を利用し、通信事業者は基地局を設置することを考えると、デバイス流通が非常に重要なポイントになってくる。また、広帯域でMassive MIMOが前提となってきたので、最初から考えておかなければならない。ただし、どの周波数でどこまで対応するのかについては検討が必要であり、5G evolution & 6Gはタイムラインが決まっているため、例えば2030年代に提供できる技術、30年代後半にならないと適用できないデバイスなど、どの技術やデバイスを適用するか、マイグレーションのシナリオを総合的に考えていく必要がある。

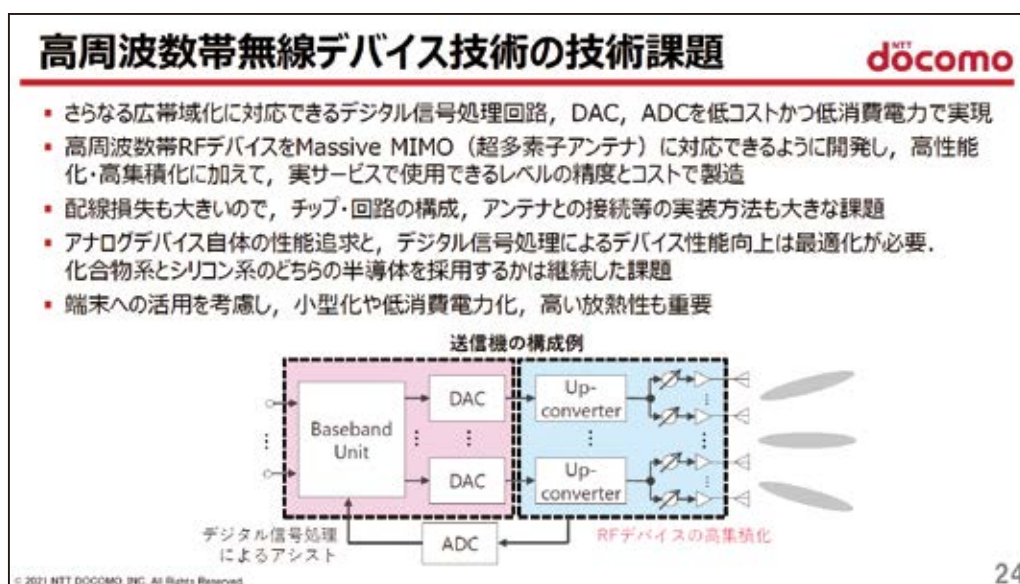


図3-1-8 高周波数帯無線デバイス技術の技術課題

• 100GHz帯で超高速通信を実現する6Gシミュレーター

6Gでは、100GHz以上のサブテラヘルツ波も利用されることが議論されており、NTTドコモでは、まずはシステムレベルの6Gシミュレーターで検証している。

• 空・海・宇宙へのカバレッジ拡張

5G evolution & 6Gでは、HAPSやGEO、LEOの利用が検討されており、重要なポイントである。実用化が可能な部分から開始していくという考えで検証を進めている。リアルタイムのHAPSシミュレーターを構築し、無線技術のシミュレーションと組み合わせて、例えば空にHAPSを2台配置した場合のHAPSならではのユースケースや通信容量の評価などを進めている。

• URLLCの拡張および産業向けネットワーク（説明は省略）

• 移動通信以外の無線通信技術のインテグレーション

ユーザーはインターネットにつながればよく、通信事業者はどれだけ安くエコにサービスを提供できるかという観点で考えると、必ずしも移動通信（セルラー技術）だけでなく、様々な無線技術を組み合わせていく方が、最終的にトータルではユーザーにも通信事業者にもメリットがあるのではないかと考えている。その中で、NTN（Non-Terrestrial Network）やHAPS、衛星等も融合されるべき話であるし、海中通信といったものについても考えている。

• 無線通信システムの多機能化とAI技術の活用、移動通信のあらゆる領域におけるAI技術の活用

基本的に、6Gは、AIを含んだシステムとなるため、無線技術にもAIを使うし、AIを用いたアプリケーションも当然増えていくと考えている。また、センシングについては、基地局と端末、あるいは基地局間の電波をセンシングなど情報伝送以外の様々な用途にも利用していく進化も有望である。移動通信事業者としても付加価値をつけるという観点で非常に期待している。

• ネットワークアーキテクチャ

これまでのツリー型、スター型とは違う新しいトポロジーも考えていく必要がある。従来は、端末と無線基地局の機能が明確に分離されていたが、6Gでは、端末の機能の一部を基地局に配置するなど、柔軟に変えていくことも考えられる。基地局も、当然バーチャライゼーション（仮想化）やソフトウェアライゼーション（ソフトウェア化）されるため、機能配置を柔軟に変更できると考えている。このように、アーキテクチャも非常に重要な技術である。

【質疑応答】

Q：Massive MIMOをアナログかデジタルビームフォーミングのどちらにするのかは、今後のデバイスの研究計画に関係する。特に、日本には高速なAD変換器のメーカーがないため、デジタルの場合はデバイスを全て海外から調達する必要もある。5Gの28GHzのミリ波の場合には全てアナログでシングルビームだが、今後6Gに向けてデバイスの研究者に何に取り組んで欲しいか。

A：5GでMassive MIMOを導入する時に、デジタルにするのかアナログにするのかハイブリッドにするのかの議論があった。5Gの前半はアナログで始め、徐々にデジタル化が進み、中間的にいわゆるハイブリッドビームフォーミングになり、最終的にはデジタルになるという流れを考えており、研究としては比較的ハイブリッドビームフォーミングを支持している立場である。図3-1-8はアナログビームフォーミングになっているが、デジタルビームフォーミングの適用もあると考えている。ただ、5Gのミリ波は28GHz帯の帯域幅800MHzで実証実験を始めたが、AD/DA変換器を何系統も用意する必要がある。

基地局は何とか冷却できるが、端末は冷却できない。このため、我々はハイブリッドビームフォーミングを考えており、デジタルについては対応したデバイスの進化に合わせたマイグレーションのシナリオを考える。6Gのテラヘルツ波用には新しくデバイスが必要になるが、ミリ波用については今後のデバイスの進化に合わせて変えていけばよいのではないかと考えている。DA/AD周りやデジタル信号処理の部分は、FPGAなのかASICも含め、デジ・アナ混在のところをどう作っていくのか、非常に重要な課題だと認識している。これは、5G evolutionでも同様だと考えている。

Q：アナログかデジタルかは、デバイスの研究者が考えるのか。

A：性能の観点からはデジタルのほうがよいが、省エネの観点からは要求する帯域幅と周波数バンドでは、おそらくその性能まで実現できないと考えられる。また、基地局だけの議論ではなく端末も含めて検討する必要があり、デバイス技術の進化とともに議論すべきと考えている。デバイス技術の進化については専門家に任せたいので、我々はマイルストーンや条件を出すのが重要だと考えている。

Q：図3-1-7の「6Gに向けた周波数帯の開拓」では、6G Low/Mid-bandは5Gと被るが、6Gの定義はどのようなものか。

A：6Gと5Gで同じバンドを使う可能性はあると考えている。例えば、2030年代に6Gのサービスを提供していく中で、5Gや4Gを終了してそのバンドに6Gを導入するかもしれないし、5Gのバンドに6Gを導入することで通信容量を拡大できるのであれば、通信事業者にとって6Gに移行するメリットとなる。6Gは標準化も始まっていないので、6Gの定義はない状況である。現在でも4Gのバンドで5Gのサービスを提供している通信事業者もあるので、ユーザーからすると世代がどちらなのかは関係ないのではないかなと思う。

Q：6G High-bandで必要なデバイスのテクノロジーと要求はどのようなものか。

A：ここで説明できることはないので、デバイスの専門家からの講演を参考にして欲しい。

Q：図3-1-8「高周波数帯無線デバイス技術の技術課題」の構成は、テブテラヘルツでも変わらないと考えて良いか。

A：高い周波数帯になると出力が出ないと思うので、一個一個のアンプの容量が減るため、アンテナを並べた方がいいのではないかなというのが基本的な考え方である。

Q：超高速100Gbpsとカバレッジ100%を両立するのは難しく、ごく限られた条件でしか実現できないと使いづらい。どのあたりを狙っていくかが技術的な難しさであり、6Gの価値に大きく関わってくるが、どのように考えているか。

A：両立は難しいので、ユースケース次第だと思う。ユーザーが利用してくれないと価値がないので、ユースケースにあった要求条件でサービスインしていく必要がある。ユーザーが増えればコストも安くなっていく。100Gbpsはあくまで技術的なスペックで、実際のサービスについてはユースケースを決めて、通信事業者の判断で進めるべきである。

Q：HAPSについては、各通信事業者が空飛ぶ基地局のイメージで開発していると思うが、LEOコンステレーションのように、HAPSのコンステレーションを提供する専門会社が参入するシナリオや、通信事業者が協力してHAPSコンステレーションを構築する方向性などあるのか。

A：NTTドコモとしてではなく個人的な回答になる。通信事業者間で基地局をシェアリングする議論は5Gのミリ波でもあるので、通信事業者が個々に構築してビジネスとして成り立つかどうかにもよるが、今後、HAPSなどでもシェアリングする可能性はあるのではないかなと思う。まだ検討している段階で、実際のサービスの形はもう少し現実味を帯びてからになると思う。

3.2 Beyond 5G に向けた研究開発

中尾 彰宏 (東京大学)

私は大学主体の取組と国の取組における連携と役割分担、情報通信の民主化を加速する政策、双方向のグローバル化・国際連携戦略の重要性、Time-to-Marketを短縮するためのソフトウェア化が非常に重要と思っている。全てをソフトウェアでつくるということではなく、目的型Time-to-Marketを短縮して非常に素早く開発サイクルを回していく戦略が重要である。また一般の人たちにとってはどのような価値創造、行動変容が起こるかということを説明していく必要があると思っている。

大学の役割には5つあると思う。先導的な研究、国際連携、若手人材育成、民主化アプローチとキャンパス・テストベッドだが、全部は説明できないので、最近考えている民主化アプローチとキャンパス・テストベッドの2つについて説明する。

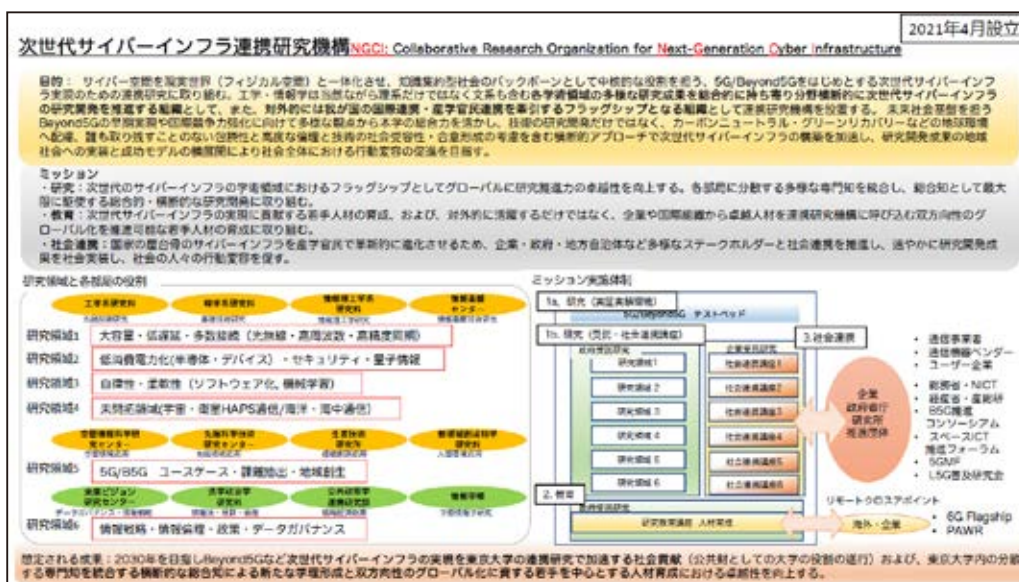


図3-2-1 東京大学「次世代サーバーインフラ連携研究機構」の概要

図3-2-1は私が機構長を務めている東京大学がBeyond 5Gの研究開発のためにつくった連携研究機構（NGCI）の概要である。特徴は、理系の部局だけではなく文系の部局も入り、多様な人たちが次世代のサイバーインフラを考える構成を取っている点である。産学連携はもちろんだが、海外との連携もこの機構を中心として、多数の部局の連合体、言わば組織の仮想化になっており、インフラの仮想化と同じように、物理的な部局はそのままにして仮想的な層を上に乗せている構成である。常に多様な産学連携とベンチャーと一緒に取り組んでいる。

大学ができることは、インフラを社会展開して実装するミッションではなく、研究寄りである。ただし、図3-2-2に示すようにキャンパスは社会の縮図になっているところがあるので、技術を開発していく上で日々新たなことを試してみる、今回のテーマである光と無線の融合を試すなど、そのようなことができる環境があると考えている。

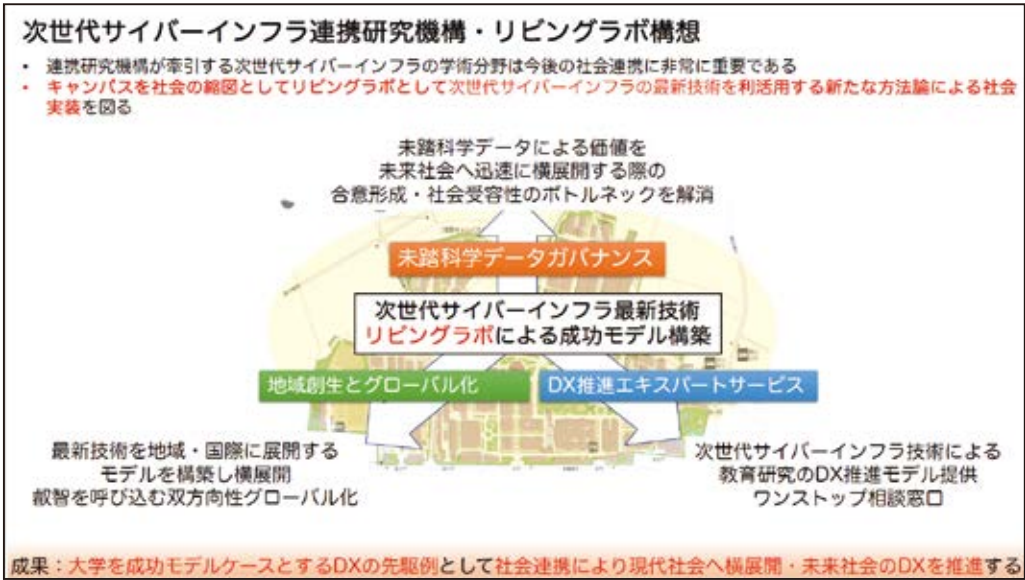


図3-2-2 次世代サイバーインフラ連携研究機構におけるリビングラボ構想

図3-2-3に示すように、私はいつも「通信の民主化」ということを話している。ローカル5Gがきっかけだが、民主化で重要なのは情報通信を自分事と捉えるステークホルダーが増えるということである。例えばローカル5Gは、これまでドコモに全て頼っていて使う側だけだったが、創る気持ちになる人が増えてきた。

世界的に見ても日本の取組は先進的だが、一般事業者が5Gの電波利用を可能とする政策が打たれたことで、ステークホルダーを増やしていけるのが重要である。多様性と包摂性によって革新の確率を上げることができるので、様々な人が入って情報通信に興味を持って取り組むところがよいのではないだろうか。

通信事業者が不要と言っているのではない。一般的な事業者は局所的な革新をどんどん多様性でつくっていくが、これを普遍サービスに展開するのが通信事業者である。双方が両輪で推進していくことができるので、このような方式から我々は気づきを得たと思っている。

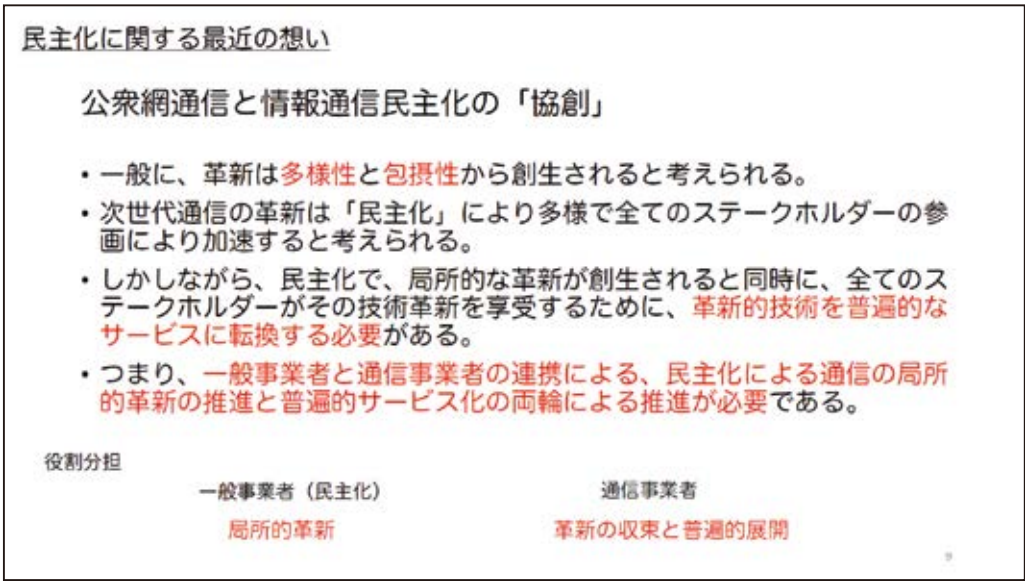


図3-2-3 公衆網通信と情報通信民主化の「協創」

我々は、大容量・低遅延・多数接続ということで通信を説明しているが、先日のCEATECで一般の方々がどう思っているかアンケートを取ると、もっと安くというのは当たり前として、もっと導入事例の情報が欲しいということが多かった。大容量・低遅延・多数接続と聞いて価値を想像できる人はなかなかいないのではないか。すなわち、どのような価値や、それに伴う行動変容かである。価値が生み出されると行動が変わり、行動変容が起こるという理解が進めば、情報通信が自分の事になって民主化が起こり、そして多くの人とその革新に関わることができるのではないかと考えている。

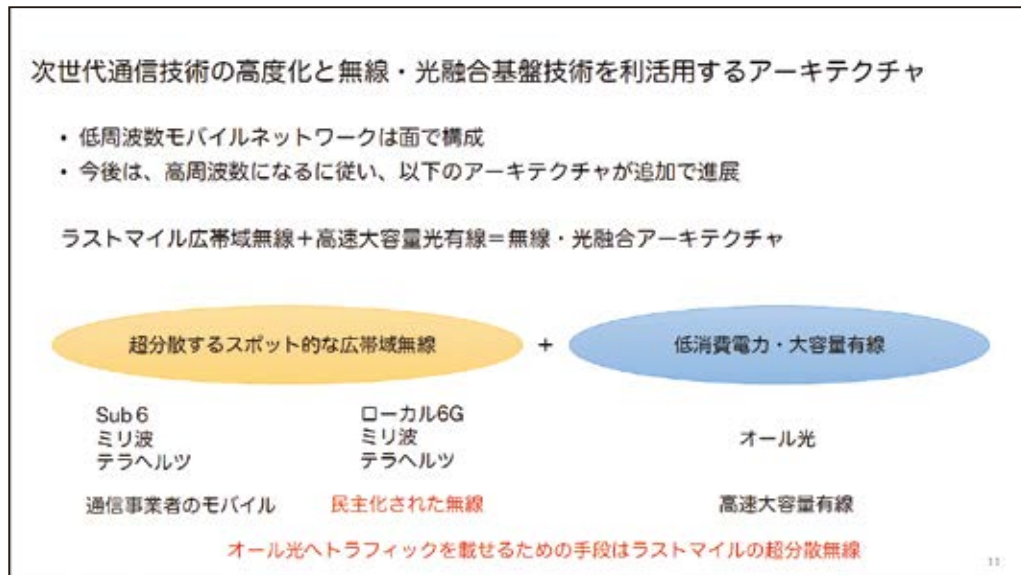


図 3-2-4 次世代通信技術の高度化と無線・光融合基盤技術を活用するアーキテクチャ

今回のテーマである無線と光の融合の基盤技術に関して、何が起こりそうかという話をする。低周波数を利用した使いやすいモバイルネットワークは面で構成されてきたが、ミリ波、テラヘルツ波になるにしたがってスポット的な広帯域無線が出てくる。これで面をつくるのは大変なので、目指すべきアーキテクチャとしては図 3-2-4 に示すように大容量の光無線でラストワンマイルまで引っ張って、ラストマイルだけ広帯域無線とするのが今後の目指すアーキテクチャではないか。通信事業者だけのモバイルだけでなく、民主化された無線のようなものもうまく活用し、また共用設備のようなものを使うことによって高速大容量で引っ張った上で、オール光ヘトラフィックを乗せるための手段としてラストワンマイルの超分散無線があるのではないかと考えている。

先ほども IOWN 構想の話が出たが、オール光のネットワークアーキテクチャはいろいろな意味で必要であり、低消費電力だけではなく低遅延のサービスを実現するためにも重要である。今までイーサネットや PC をつないで使っていたラストワンマイルをオール光にするためにはどうすればよいか。やはり無線でつなぐというアイデアが出てくる。あとは併用のアーキテクチャの問題である。どのようにしてコストの低いパケットスイッチとオール光をシームレスにマイグレーションさせるか、併用させるためのアーキテクチャが必要と思っている。

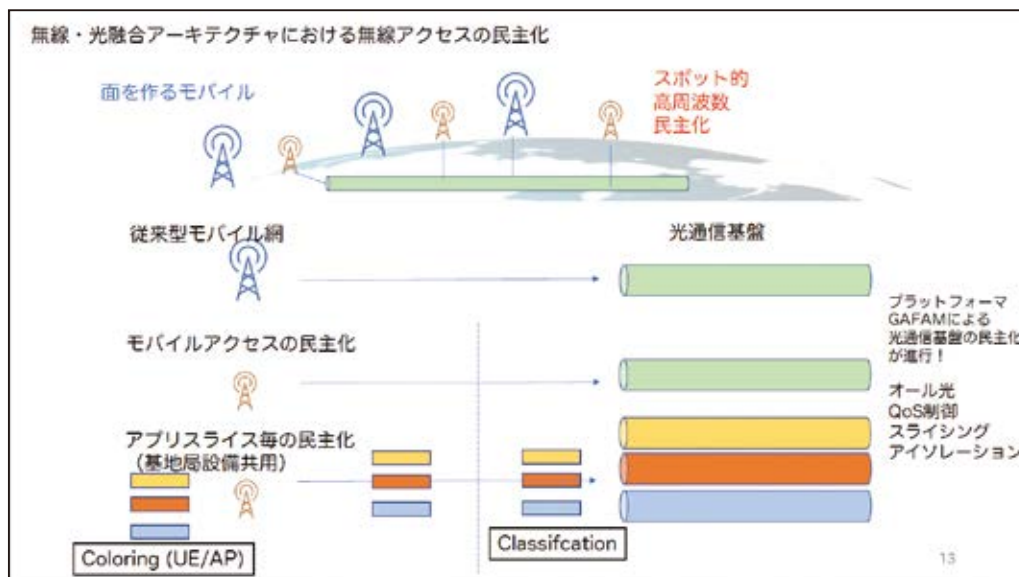


図3-2-5 無線・光融合アーキテクチャにおける無線アクセスの民主化

面をつくるモバイルとラストワンマイルを広帯域にして光とつないでいくときに、民主化されたところを使うことや、あるいは基地局の設備共用をスライスごとにつなぐことができれば、こういったアーキテクチャをシームレスにマイグレートさせていくことができるのではないかと考えている（図3-2-5）。またプラットフォームがどんどん光通信の整備をしているので、光通信基盤の民主化が進行していき、こういったモバイルの民主化もそれに追隨していくのではないかと考えている。

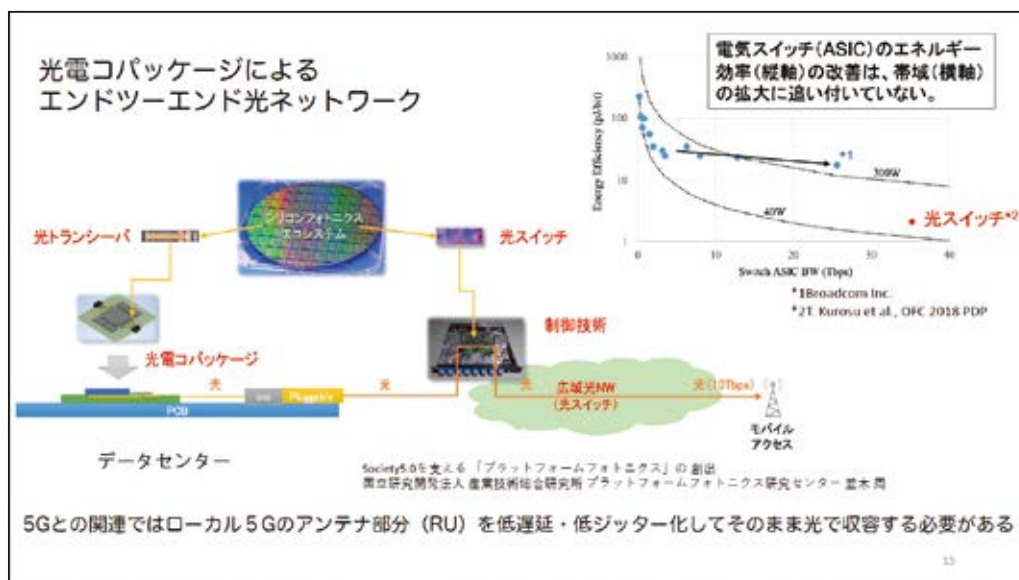


図3-2-6 光電コパッケージによるエンドツーエンド光ネットワーク

また、光電コパッケージの話もある。図3-2-6は産総研の並木氏のスライドを一部拝借したもののだが、データセンターだけではなく、このモバイルのアクセスのところにも低遅延・低ジッター化が必要である。低ジッターのアプリケーションとして遠隔手術など様々なものがあるので、そのまま光で収容する必要がある、このような技術がクラウド側だけではなくモバイル側でも必要となる。

国際連携について述べる。私がBeyond 5Gの推進コンソーシアムでやっている国際委員会では、様々な国の動向を調べている。その中で、6Gフラッグシップのホワイトペーパーでは、30か国270人が参加して白書をつくっている。つまり、もはや1国で行う話ではなく、多数の国、多数の人たちが関わって共通なビジョンをつくっている。

国際連携戦略への一つの提言：「双方向」のグローバル化

- ・ 情報通信は、言うまでもなく、国民の安心を支える重要要素
- ・ 経済安全保障という観点からも基本
- ・ 「国際競争力」強化だけではなく、同時に国を超えて、連携協力して、新しい知恵を生み出すための「国際協創力」も不可欠
- ・ 先行する各国の動きと連携し、技術の輸出だけではなく、優れた知恵と人材が日本に集まるという「双方向のグローバル化」が重要
- ・ フィンランドでは、世界に先駆けて6G Flagshipというプロジェクトが先行しています。まさに2030年に向けた6Gの実現に「旗艦」の役割を果たすプロジェクトとして推進されており、世界が注目
- ・ 日タリアルタイムに会話（意見交換）をする「場」（環境）が必要

図3-2-7 国際連携戦略への一つの低減

このようなことから、図3-2-7に示すように私は双方向のグローバル化が必要と思っている。国際競争力だけでなく、国際協創力（共につくる）が不可欠である。我々はグローバル化と言うと日本の技術を輸出することだけを考えるが、優れた知恵と人材が日本に集まるという双方向のグローバル化が重要なのではないか。

もう一つは、日タリアルタイムに意見交換をする場が必要ということである。6Gフラッグシップのディレクターは東大の肩書を持っている。これは私が仕掛けたのだが、物理的に来るとコロナに感染する可能性がある。東大工学系初のリモートのクロスアポイントメントである。私の過去からの友人である彼にお願いして、兼務でグローバルフェローとして東大の先生になってもらった。彼は非常に喜んで東大の肩書をプレゼンにつけるようになり、大きなニュースにもなった。このように、外から入ってきてもらって一緒にビジョンを共有する活動が必要ではないか。特に、日タリアルタイムに意見交換をしながら、ビジョンの形成とともに彼らが持っている強みの技術と日本の技術を組合せるといったところが重要であり、また何かあったときにはすぐに意見交換ができるというのが重要だと思う。東大にはこのグローバルフェローの称号制度があり、これからこのような人たちを増やしていき、連携研究機構の中に入れて一緒に活動していきたいと思っている。

これまで話したことを図3-2-8にまとめる。重要なのは民主化を使った多様性の取り入れと、グローバル化、国際連携戦略である。ソフトウェア化の話もしたが、今回は時間がなかったので別の機会に話したい。さらにグローバルなビジョンの共有、価値協創と目的とする行動変容、先進技術のマッピングなどが重要ではないかと考えている。

Beyond5Gの研究開発を進める上で特に重要と思うこと

- 大学主体の取組と国の取組における連携と役割分担
- 情報通信の民主化を加速する政策
- 双方向性のグローバル化・国際連携戦略の重要性
- Time-to-Marketを短縮するためのソフトウェア化
- Beyond 5Gが実現する社会におけるグローバルなビジョンの共有
- 先進技術とそれがもたらす価値協創と目的とする行動変容のマッピング
(要素技術のKPIも重要だが、どんな価値・行動変容がおこるのが重要)

図3-2-8 Byond5Gの研究開発を進める上での重要な点

【質疑応答】

Q：双方向のグローバル化は非常に重要な点だと思うが、大学の人も含めて必ずしも日本人が得意なところではないと思っている。先生の機構では、グローバルフェローという形でうまく進めることができている理由は何か。

A：我々は様々な国プロに取り組んできており、その中で海外との連携のプロジェクトもあった。同じ苦労を共にして、我々は総務省や経産省に報告書を書くのだが、成果と社会実装と価値を示していく必要があり、これを海外の人たちと共同作業したので人的な絆ができた。このマッティ教授は今はディレクターだが、実は私とは10年前に出会って、ずっと一緒にプロジェクト推進の打合せをしていた人である。時間がなくて話せなかったが、例えばNSFからファンドされているPAWRプロジェクトのディレクターとの連携も長期間に渡る。このように、次にグローバルフェローになってもらおうと思っている人も、私が15年ぐらい前からやってきたプロジェクトで苦労を共にした人である。そのような意味では、国の政策としてそれほど大きなファンドでなくてもよいが、多くの人たちと苦労を共にするプロジェクト（例えばBeyond 5Gやポスト5Gのような1つのテーマ）を一緒にやっているとよい。そこでできた絆が、例えば「グローバルフェローになってくれないか」と言う二つ返事で承諾してくれたり、MOUをすぐに結んだりすることに繋がる。気心が知れた人の関係で連携を起こしていくことができている。これが最初に書いた「学術界のつながりを活用する国際連携」になる。

Q：今の若い世代の方も早い時期から海外との連携に積極的に取り組み、よい意味での人脈をきちんとつくっていくことが重要ということか。

A：一緒に苦労して成果を成し遂げたという経験が重要と思う。

Q：フィンランドのOulu大学はアカデミアでありながらこの世界を強力に引っ張っているが、何が特徴で日本はどういうところを学ぶべきか。また、産学連携の点ではノキアが入っているが、どのような関係を構築しているのか。産学連携という立場でも日本が学ばなければいけないところ、特徴的なところはどこか。

A：彼らのBeyond 5Gの取り組みを分析したところ、3つぐらい柱がある。そのうちの1つがテストネットワークで5GNTという活動をしており、先ほど述べたキャンパス・テストベッドと同じように、キャンパスとVTTなど様々な場所を借りてテストベッドをつくっている。ここを苗床として、ビジネスのインキュベーションを足場にして6Gに取り組む活動をしている。フィンランドだけではなく、米国、英国も同じ

ような活動をしている。日々使いながら課題を抽出して方向修正していくことを、6Gに対して最初に始めたところが大きな特徴である。また、ホワイトペーパーのように他国を積極的に巻き込んでいる点も特徴で、これによって情報を集約させて6Gのビジネスをリードする狙いがある。早い段階から他国を巻き込んで強いものを持っている人たちと連携する国際連携戦略を立てる必要があると思っている。

C：大学をテストベッドにしてリスクのある技術をそこで実証することは、この分野だけではなく様々な分野で展開できる気がする。

Q：民主化によって世界中の開発力が集中し、それでさらに広まっていく面もあるので、民主化は本当に大事と思う反面、あまり野放しにすると変な方向に行くのではないかという危惧もある。その点について、強過ぎない規制で健全に発展するようにするにはどうすればよいと思われるか。

A：様々なステークホルダーが参入することから、民主化は革新の確率を上げることができるが、ガバナンスの問題はある。これには政策、法学、政治学などの先生方が一緒になってデータの扱いや技術の扱いを考えていく必要があると思う。ただし、民主化のよいところは、あまり変なことをしている人たちの活動は社会受容性がないので、自然に淘汰されていく可能性が大きいことである。価値を生む技術はみんなが使っていこうとする動きにつながるので、ある程度は自然淘汰されるはずである。一方で、指摘のとおりガバナンスの面をきちんと考えていく活動も並行してやる必要があると思う。

Q：5G、6Gに向けて今までになかったサービスをつくっていくためには、民主化はますます重要になると思う。一方、特に6Gでは帯域やエネルギーの問題を考えると、光のレイヤーを簡単に活用できるように環境を整えていく必要があると思うが、光はただでさえ使い難いことから、光のレイヤーを含めた民主化は程遠い状況とも思える。どういうアプローチあるいは政策を取れば、民主化がもっと進むと考えるか。

A：私自身はローカル5Gの基地局などを自分たちで設計・開発しているが、2つの思いがある。1つは、基地局だけではなくバックホールが必要な点である。使いたい場所に信号が届かない山岳地帯、山の奥、沿岸地区あるいは離島でやるといったときに、ファイバーを自分たちで引きたいと本当に思っている。もう一つは、民主化を加速するためには、何に使うかという部分の理解が必要ということである。私の周りでは、割と光通信の利用というところに一般の人の興味が出てきているのではないかと思っている。GAFAMが自分たちで光のインフラを整備していることも民主化の1つである。GAFAMのデータセンター内の消費電力を大きく削減しなければならないという需要から、データセンターでの光電コパッケージがかなり進展したと思っている。もちろん政策は必要だが、情報通信を使う人たち、あるいは作る人たちの幅を広げることによって、技術革新と技術の利用、どうやって光を安く手軽に使えるようになるのか考えるようになると思う。我々は無線と光の融合をローカル5Gの環境で始めようとしているところなので、これがもう少し進めば、社会受容性が高くなっていくと思っている。

C：政策も重要だと思うが、やはりまず技術側からどんどん盛り上げることも重要と理解した。

C：技術側とユースケース側だと思う。価値が分かると使っていける。

C：そのような意味では、価値が分かる人が「光って何だろう」という状況がまだ少しあると思う。その辺の距離がだんだん縮み始めてきているので、まさに先ほど議論されていた間を取り持つような人や機会が増えればよいと思う。

4 | 次世代通信技術に向けた挑戦的な無線・光融合基盤技術の研究開発

4.1 THzシステムに向けたデバイス・回路技術

永妻 忠夫（大阪大学）

ここでは、全体のオーバービューと重なるかもしれないが、エレクトロニクスの躍進、6Gの一つのターゲットの100ギガビットの実現、本ワークショップの話題の中心である光（フォトンクス）技術と電波（エレクトロニクス）技術の融合によるテラヘルツ無線、今後の技術課題とソリューション、三次元空間への展開、という5つのテーマについて紹介する。

まず、エレクトロニクス技術が躍進してきたことについて紹介する。電子デバイス・集積回路技術は化合物半導体およびシリコン半導体ともに f_{max} が伸びてきており、さらにこれらがヘテロジニアスに集積され、電子光集積もシリコンフォトンクスにより進んできている。その中で、例えば図4-1-1に示すような1THzの増幅器（1dBずつ重ねて9dBを実現）も技術的には可能になっている。しかし、通信では増幅器としてある程度の利得（パワー）が必要なため、海外ではより実用的なものとして、窒化ガリウム（GaN）でGバンド（140~220GHz）、InGaAsのHEMTでHバンド（200~300GHz）の増幅器が開発されている。

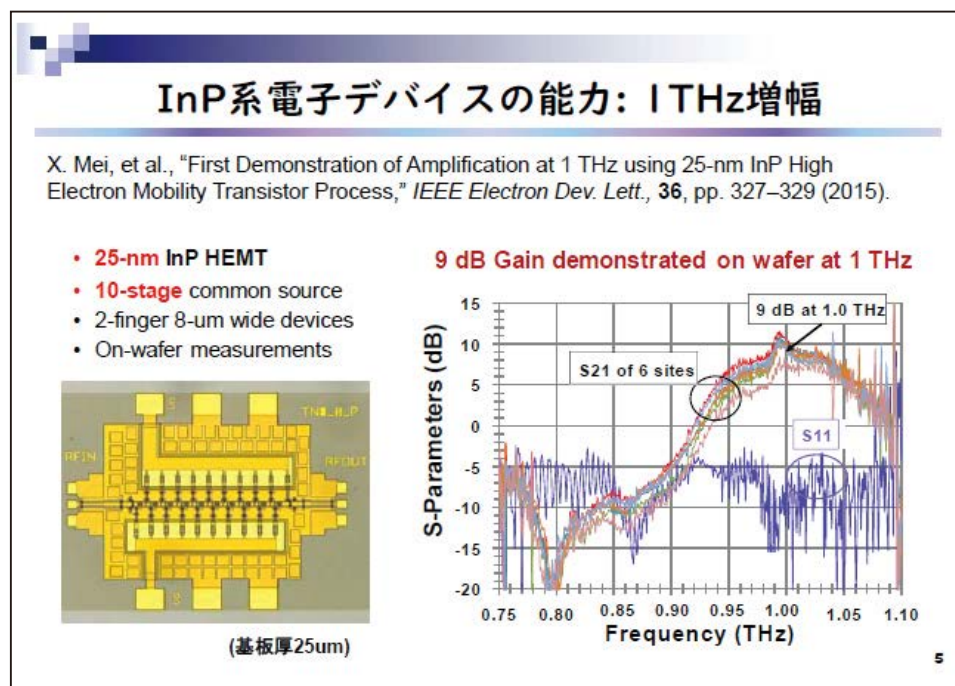


図4-1-1 InP系電子デバイスの能力

我々はロームとの共同研究で、共鳴トンネルダイオード（RTD）を用い、LEDのようにこのダイオードだけで無線通信を行うための研究を10年近く行っている。共鳴トンネルダイオードを用いることで、近距離であれば300GHzにおいて30Gbpsのエラーフリー、簡単な前方誤り訂正技術（FEC）があれば60Gbps程度まで実現できた。これは大学で設計した回路であるが、私は100Gbps程度までは動作すると考えている。ダイオードを使ったトランシーバは回路構成がシンプルなので、このようなことができる。

また、シリコン集積回路を用いた信号発生器の例として、シリコンゲルマニウム（SiGe）HBTをアレイ状に配置して電力合成することで、1THzで100μWという驚異的な結果が報告されている。

図4-1-2は無線応用の現状を見たもので、横軸がキャリア周波数、縦軸が伝送速度を示し、フォトニクス技術およびエレクトロニクス技術を使ったものをプロットしている。最近では、エレクトロニクス技術で100Gbpsを超える結果が報告されている。いずれも200GHzから400GHzのキャリア周波数を用いることで100Gbpsを達成しているが、これは非常に広いバンド幅が使えるからである。このように、100Gbpsは研究レベルでは達成できており、様々な応用に向けたデモンストレーションも始まっている。以上のように、従来はフォトニクス技術の独壇場であったTHz無線であるが、近年、エレクトロニクスの技術の躍進が著しい。

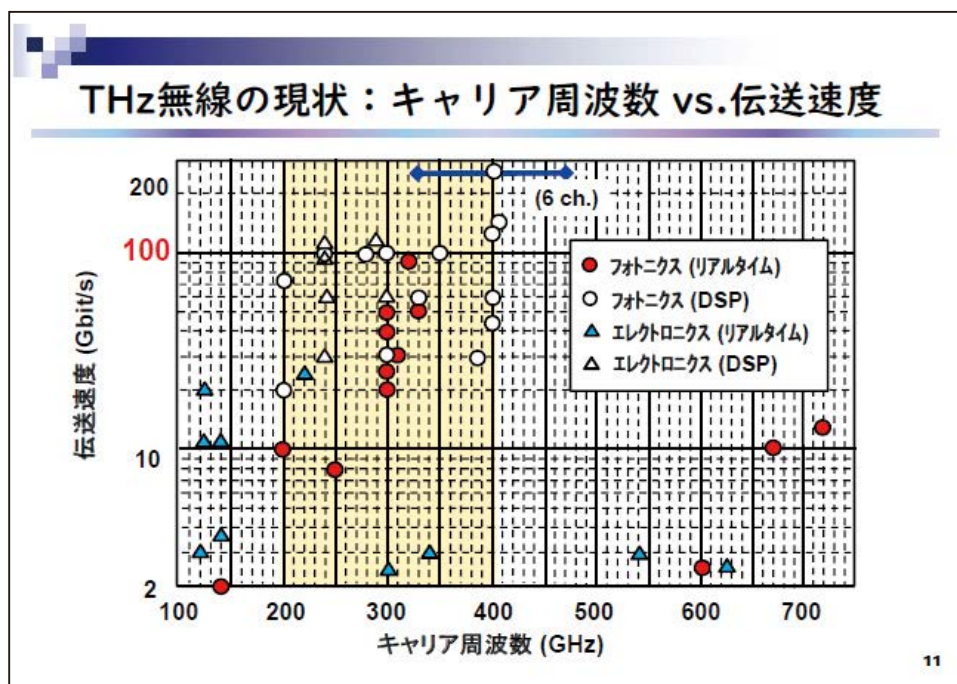


図4-1-2 THz無線の現状

また、200Gbpsを超える伝送速度の報告もあるが、これはまだフォトニクス技術（マルチチャネル）を使ったものである。私は200～400GHzだけでなく、100GHz帯にも注目すべきだろうと思う。変調の多値化を進めれば、Dバンド（110～170GHz）でも100Gbpsを実現できる可能性がある。

200～300GHz帯無線技術の研究開発状況をもう少し詳しく説明する。NTTより、InP HEMTを使い、120Gbps、10メートル伝送の報告がされている。また、ドイツの大学から、SiGe HBTを使い、240GHz帯で偏波多重によって110Gbpsを達成したという報告がされている。一つの方向性を示すものとして、最近発表された東工大とNTTの共同研究により、300GHz帯でのInP ICとSi-CMOS ICとの融合について報告されている。パワーアンプ、プリアンプにInP ICによるモジュール、その他のICモジュールをSi ICで構成したトランシーバを実現した。今後、こうした化合物半導体とシリコン半導体との融合技術がさらに進んでいくものと期待される。

さて、今後、光（フォトニクス）技術がどう生き残っていくのか、どのように活用されるのかについて議論してみたい。まず、図4-1-3に示すような光技術を使ったテラヘルツ無線の基本形から議論を始める。送信機の基本形は、最初に2波長の光を用意し、光変調を施した後、光信号を電気（RF）信号に変換する。一方、受信系においては、これまではほとんどの場合、光技術を使っていない。すなわち、様々な種類の検波ダイオードを使い、直接検波を行なうか、LO信号を印加することでヘテロダイン/ホモダイン受信を行なう。

ここでの重要なポイントは、2波長の光を混ぜること（フォトミキシング）である。図4-1-4はこのフォトミキシングを活用した象徴的な例である。レーザからの光をデータ信号で光変調したものを、フォトダイオードでデータ信号を復調するのが、光（有線）リンク（ λ_1 の光リンク）である。この光リンクが切れた場合に、無線リンクにするのは非常に簡単である。もう一つ光源（ λ_2 ）を用意して、 λ_1 と λ_2 を合波し、高速のフォトダイオードで受けるとRF（電波）に変わる。この電波の周波数は、2つの光の波長差だけで決まる。

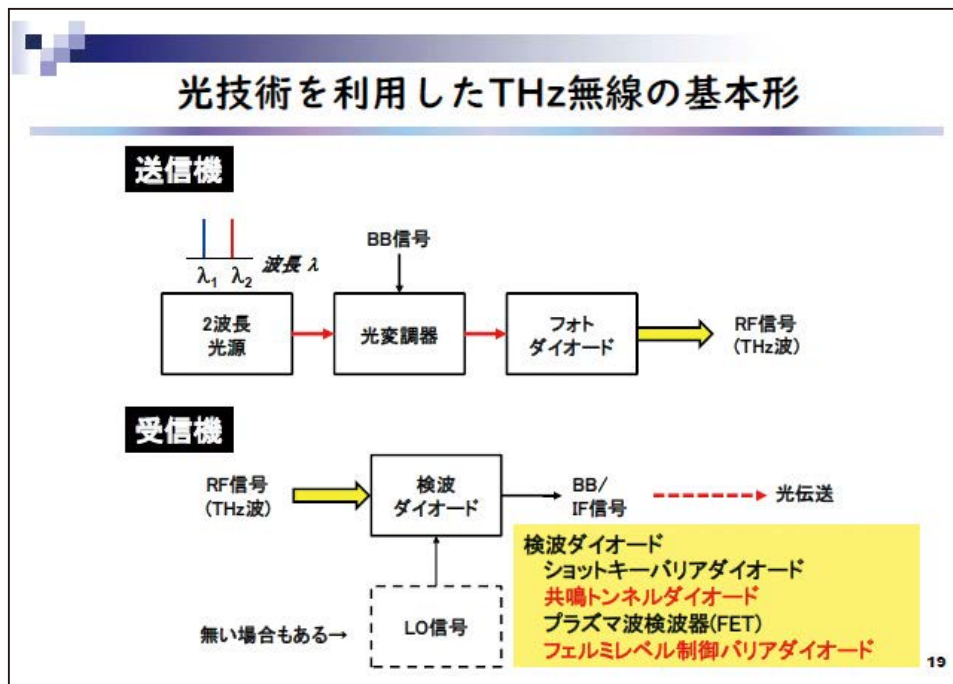


図4-1-3 光技術を利用したTHz無線の基本形

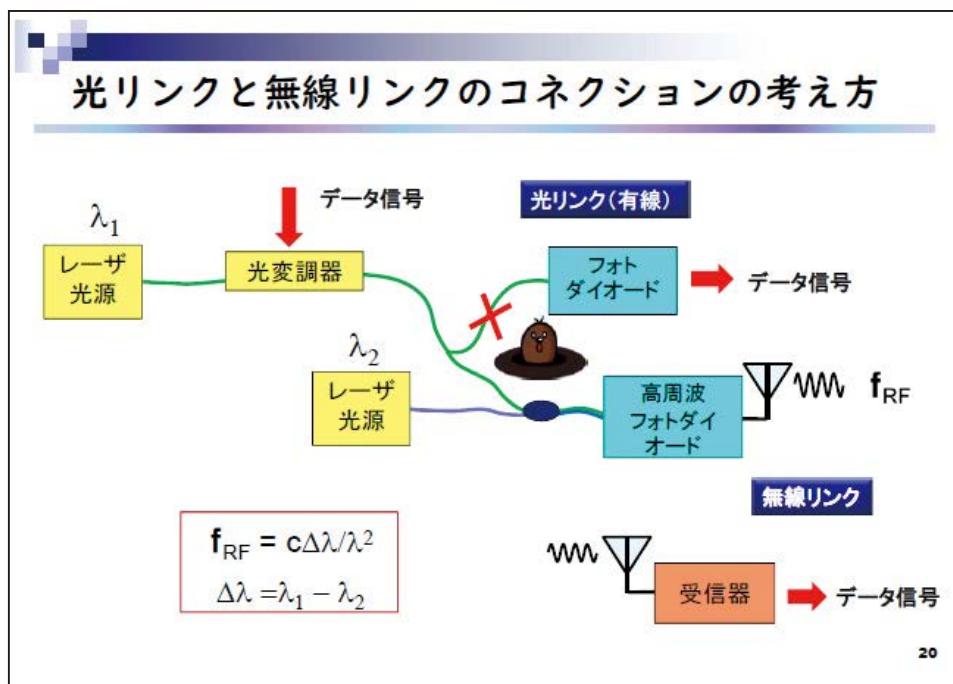


図4-1-4 光リンクと無線リンクの接続の考え方

光の波長を変えるだけで電波の周波数が変わるので、この周波数の電波を復調できる受信機があれば光リンクがそのままRFリンクになる。まさに光通信と電波（無線）通信の融合の典型と言ってよい。

次に、キャリア周波数と伝送距離の報告例を図4-1-5に示す。大阪大学とドイツの報告では、300GHz帯ではおよそ100mとなっている。図の上にある120GHz帯（中心中波数125GHz）は、我が国（総務省）が100GHzを超える周波数に対し、世界で初めて商用（放送素材伝送）にアロケーションした周波数帯である。周波数帯域幅として18GHzあり、60GHz帯の2倍に相当する。2019年の世界無線会議において、200～300GHz帯で44GHzの帯域が特定され、周波数アロケーションに向けた国際的な議論が始まったところであるが、我が国としては、既に国内でアロケーションされた120GHz帯を、総務省と連携してBeyond5G/6G応用に対し開放していったらどうかと考える。この周波数でも、窒化ガリウムのアンプを使えば、恐らく10kmは飛ぶと期待され、256QAMを使えば100Gbpsが伝送できると予想される。

キャリア周波数	速度	距離	Ref.
125 GHz (18GHz)	10 Gbit/s (OOK/real time)	5.8 km	A. Hirata et al., ICWITS 2010
240 GHz	64 Gbit/s (QPSK/off line)	850 m	I. Kallfass et al., J. IRMMW/THz, 2015
320 GHz	70 Gbit/s (QPSK/real time)	100 m	K. Iwamoto et al., MTSA 2017
300 GHz	100 Gbit/s (QPSK/off line)	110 m	T. Harter et al., ECOC 2018

JPNは周波数割当済(2014)

22

図4-1-5 キャリア周波数と伝送距離

図4-1-6は大阪大学で行った320GHzでのQPSK（4位相偏移変調）による100m伝送実験で得られた伝送特性である。光技術を使った送信機とアナログの簡単な復調器を使っている。アンプは使っておらず、フォトダイオードから直接発生したレベル（50μW）であるが、70Gbps、100mの伝送が可能である。図4-1-5の一番下のドイツの実験も同じような簡単な方法で行っている。最先端のデジタル変調・復調技術を駆使し、そんなに高度な技術は使っていないというのが今の光技術と言える。その理由は、送信系において、光技術の方がエレクトロニクス技術よりも広帯域だからである。

今後、エレクトロニクス技術は益々発展するだろう。しかし、THz無線と光ファイバーネットワークとの融合は不可欠になると思うので、光技術の利用が無くなることは決してないと思っている。また、光技術によるTHz無線は、既に実験室から外に持ち出すことができるレベルに達しているので、様々な応用開拓に向けたデモンストレーションやフィールドトライアルを通して、THz通信の実応用を加速するであろう。

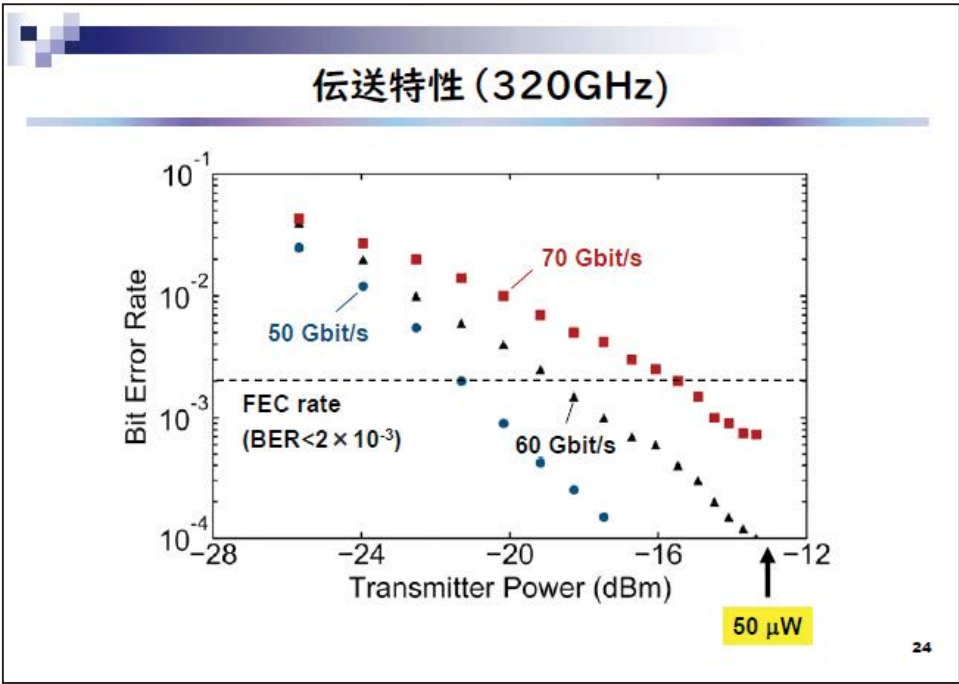


図4-1-6 QPSK100m 伝送実験の伝送特性

その他の300GHz帯の通信実験として、光技術を用いた送信器と共鳴トンネルダイオードによる受信器を使って、初めてフル8K映像の非圧縮無線伝送（48Gbps）に成功している。できればシングルチャンネルにしたかったが、デジタル映像伝送ではエラーフリー（ビット誤り率<10⁻¹²）が求められるため、24Gbpsのチャンネルを2つ用意し、FECを使わなくても安定な48Gbps伝送を行なった。

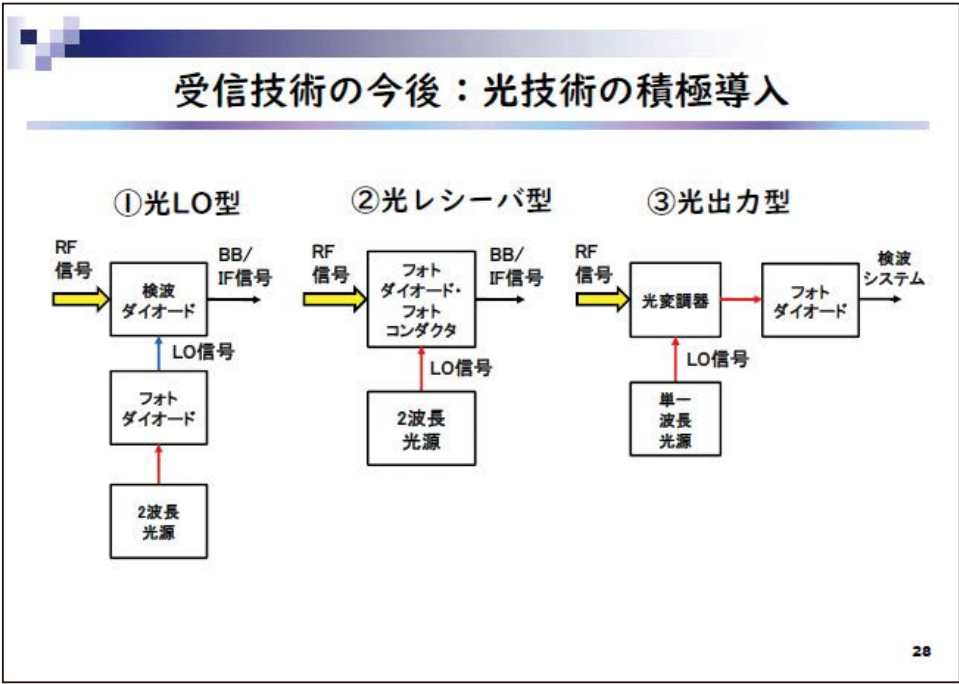


図4-1-7 受信技術の今後

これまでは光技術が送信機だけに使われることが多かったが、今後、図4-1-7に示すように受信機にも使われていくと予想している。例えば、ヘテロダイン受信機を構成する場合に必要な局部発振器（LO）においては、テラヘルツ帯では位相雑音が非常に大きくなるという問題がある。一般に、マイクロ波帯から周波数を通倍していく従来の手法、すなわちエレクトロニクス技術からの延長では位相雑音の壁にぶつかっている。そこに、同図①のように、光技術を使った低位相雑音信号発生技術（発振器）に対する期待がある。また、受信側において、テラヘルツ波を直接的に光波に変換するためのデバイスがあれば、受信側のフロントエンドにおいて、すぐに光信号として出力させることが可能となる。複雑な処理をせずにテラヘルツ波信号がシームレスに光信号に変えられることから、同図③のテラヘルツの変調器が重要な研究課題になっている。すなわち、送信側では、フォトダイオードで光波からテラヘルツ波に、受信側では、光変調器でテラヘルツ波から光波へと、光波と電波の間のメディア変換が行なわれる。日本ではまだ本格的には始まっていないが、海外ではすでにテラヘルツ帯の光変調器が報告されている。

今後の技術課題をまとめる。まずテラヘルツ帯の半導体デバイスにおいて特に重要な点は、これまでにない高電流密度で様々なデバイスが動作していることである。テラヘルツ帯では、CR時定数を下げするためにデバイス面積が小さくなる一方、所望の出力電流（出力電力）を得るために必然的に高電流密度動作になり、寿命や信頼性に影響している。したがって、サーマルマネジメントのデザインが不可欠である。また、テラヘルツ帯では、伝送線の損失が顕在化してきた。改めて金属ではなく誘電体の伝送線に関して検討が始まっている。発振器自身の低位相雑音化については、これまでの周波数通倍技術では限界を迎えており、上述のように、光技術によるブレイクスルーが期待されている。新たな低位相雑音光源の開発例として、最近、300GHz発振器が報告されており（T. Tetsumoto, T Nagatsuma et al., “Optically referenced 300 GHz millimetrewave oscillator,” Nature Photonics, 2021.）、従来技術に比べて20dB以上低雑音化できている。デバイス、システムの低電力化・高効率化をどのようにやっていくかも今後の重要な技術課題である。設計技術についても、教育、人材育成も含め、もっと強化していく必要があると思っている。回路は、電子回路というよりも「電磁波」回路になるので、電磁波、電磁気学の基本である、マックスウェルの方程式の理解が必要である。その意味では、優れた設計者、競争力のある設計者がまだまだ育つ領域だと思う。

次に集積化に関して述べる。実際に光技術を使った送信機については、フルワンチップ化が進んでいる。ヨーロッパのファンドリーを使って、レーザダイオード、光変調器、光増幅器、フォトダイオードを集積化した100GHz帯の送信機が報告されている。もちろんこれだけで通信システムが完成するわけではなくて、実際には、アンプやアンテナ、デジタルICにも必要であり、これらをどう集積するか考える必要がある。そのときに、図4-1-8に示すように、プラットフォームを何にするかが問題となる。すなわち、最終的に上記のようなチップとともにアンプやアンテナなど全ての部品を搭載したシステムを構成する場合、相互のインターコネクション（接続技術）がシステム性能を左右する。この接続には、金属の伝送線、導波管、あるいは光領域からのアプローチとして誘電体が考えられるが、光とマイクロ波の間にあるテラヘルツ領域ではどれを採用するのか、大きな命題である。個人的には両方やっていかなければいけないと思っている。現在、商品になっているテラヘルツデバイスのパッケージ（実装済の部品）は、金属機械加工を行なって導波管を作製し、そこにチップを載せて300GHz～1THzの信号の入出力を行なっている。加工に高度な技術やノウハウが必要なため、非常に高価である。新たな導波管の作製手法として、MEMS技術で導波管を作製し、それに半導体チップを実装する試みがある。具体的には、シリコン基板を使い、MEMS技術を使って所望の構造に加工した後、導波路となる部分を金属メッキする技術であり、国内では、東京工業大学から報告例がある。

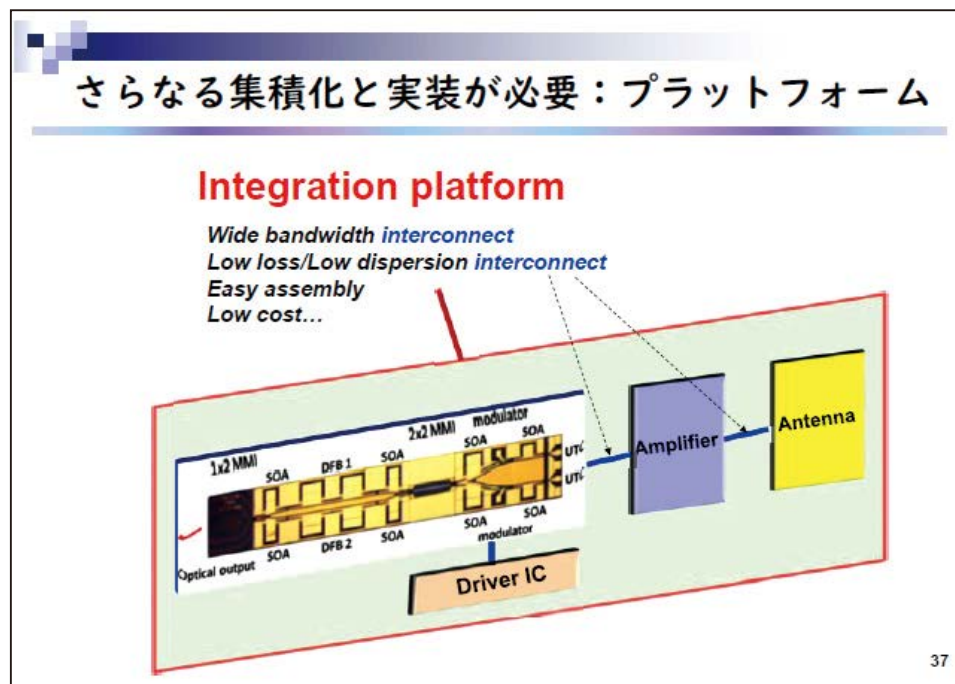


図4-1-8 プラットフォーム

もう一つのアプローチは、誘電体伝送線路でチップ間インターコネクションを行なう方法である。現在は、光インターコネクションの技術であるが、これをテラヘルツに応用して、金属の伝送線を誘電体に代えていくという発想である。実際に、シリコン基板上に誘電体導波路をつくり、300GHz帯で最も低い損失を実現した報告もある。同様のアプローチは、日本、アメリカ、ヨーロッパでも研究が盛んである。重要なのは、これをプラットフォームとして、電子デバイスを少ない接続損失で搭載できるかどうかである。ヨーロッパでは、フォトリソニック結晶基板にアクティブなデバイス（ショットキーバリアダイオード）を搭載し、ミキサー動作をさせた例がある。

最後に、「三次元空間へ」というお話をしたい。私の研究室では、学生のほぼ誰でもがテラヘルツデバイスを扱えるレベルになっていることから、学生の自主プロジェクトにおいて、ドローンを使った無線通信の実験が行われた。小型ドローンにフォトダイオードを搭載し、地上から光ファイバーで信号を送り、ドローンからテラヘルツ波を放射している。また、これはまだミリ波帯の周波数ではあるが、同様にドローンに光ファイバーが接続されたレーダーを開発した。地上でレーダー用のFMCW信号を作って、光波に変換してドローンまで伝送し、ドローンから放射されたミリ波を物体に照射し、反射波をドローンに搭載された検波器で測定している。これは実際に煙突の中の保護材の厚さを測りたいというカスタマーニーズに対して開発したものである。例えば、100メートル級の高さの煙突には登ることが大変なので、このような飛行体でセンシングできると、点検作業の効率化、安全化に貢献できる。これら2つの例のように光技術を使ったシステムが先行していたことが、新たな応用を発掘することに役立った。このような取組みを地道に行なっていくことで、最初はビッグマーケットではないかもしれないが、テラヘルツ市場が広がっていくものと信じている。テラヘルツ技術の研究開発は、今や日本全体が一丸となってやらないと海外には勝てないと思う。NICTやAISTと言った国研にも省庁の垣根を超えてご支援願いたい。

【質疑応答】

Q：光技術を使って信号発生を行なう場合、特に高度な技術は必要ないと言われたが、2つの光源に対する要求はそれほど厳しくないと考えてよいのか。

- A：必要ないと言うより、周波数の安定度や位相雑音についてあまり注力していないのが現状である。デジタル信号処理技術に大きく依存しているからである。多少の位相の揺ぎがあってもデジタル的に補償・復調したり、誤り訂正技術を使うことを前提としている。実験室レベルでは、高性能なDSPやオフライン処理は許されるが、今後、社会実装（実用化）を進めるにあたり、安定性の改善は不可欠だろう。さらなる技術開発が必要になると思う。今は個別部品で構成しているが、小型、安価、低電力化にしようすると、集積化が求められる。今後、シリコンフォトニクスのように、光・電子半導体デバイスからなる集積回路を開発していく必要があると思っている。
- Q：テラヘルツの変調器を使って受信もできるという話があったが、キャリアを変換する受け側のメリットを知りたい。
- A：最も大きなメリットは、受信フロントエンドがシンプルになり、例えば外付けのLO等が要らないことである。すなわち、受信フロントエンドではベースバンド信号へのダウンコンバージョンを行わず、単純にテラヘルツ波を光波に変換する。
- Q：光デバイスのインテグレーションを行なう際、様々なデバイスが必要ということであったが、どこでやるのか何か見通しがあれば教えてほしい。
- A：JSTの産学共創プログラムでは、レーザ、光増幅器、フォトダイオードなどの集積化を経験したが、これらは半導体薄膜を作製するためのエピタキシャル成長方法が異なる。3回の成長をしなければならず、プロセスを進める中で歩留まりが下がり、大変コストのかかる工程だと認識した。NTTグループのご支援をいただいたが、彼らの力をしてでも難しかった。一方で、ヨーロッパのファンドリーを使うことを並行して行った。このファンドリーはどちらかというとデジタル応用に開発されたものだが、設計ツールも揃っており、比較的簡単に使うことができた。ある程度の性能の光源や変調器であればファンドリーが提供するもので十分であるが、高性能デバイス、例えば300GHzで動作するフォトダイオードは提供されない。日本のPETRAプロジェクトでは、デジタル応用の高性能シリコンフォトニクス技術が開発されているが、その技術をアナログ応用にも転用していけないだろうか。また、近年、米国でも大規模な光・電子デバイスのファンドリーシステムが進展している。ぜひ、日本にも優れた部品材料技術、集積技術があると思うので、テラヘルツ応用に向けたシリコンフォトニクス技術、異種デバイス集積技術の進展に期待したい。
- C：日本国内で光のファンドリーがもう少し簡単に使えるようになるとよいと思う。
- A：NICTとAISTなどが全面的に協力してつくってほしいと思う。そこでできないものは、スタートアップやスモールラボをつくっていくことがよいと思う。
- C：しばらく前までNICTのクリーンルームファシリティの責任者をやっており、そのような方向で努力してきたが、様々な壁があって難しかった。そのため、省庁連携などで進めていくことがよいと思った。
- C：フラウンホーファーのように、エンジニアリングサンプリングのようなものを国の機関が出せるような仕組みも考えてほしい。
- Q：受信側でミキサーを使わずに、変調器を使ってテラヘルツ波を直接光へ変換するところで、2つ質問したい。一つは、テラヘルツで動く光変調器はそんな簡単にできるものなのか。もう一つは、光信号にテラヘルツが乗っているものを、最後はベースバンドやデジタル信号に落とす必要があると思うが、そこはどうなっているのか。
- A：変調器の作製は大変だったと思う。帯域を確保するためには、光と電波の相互作用長を長くできないため、ナノのギャップをつくって電界を局在させ（いわゆるプラズモニクス）、短い距離で相互作用を強めることをやっている。また、ここに使われている光変調器の材料は通常のリチウムナイオベートとは違って、非線形光学定数の大きいポリマー材料となっている。ベースバンド信号への変換については、フォトダイオードで変換すると、やはりテラヘルツのキャリアを持った信号が出てくるので、ヘテロダインのような方式でダウンコンバージョンしてベースバンドを取り出す必要がある。

4.2 Massive MIMOの限界とブレイクスルー技術

本城 和彦（電気通信大学）

今回の調査活動では主に回路部品や光電融合部品などのハードウェアに焦点を当てていると聞いているが、システム側の要求を聞いてそのままデバイス開発ができるという状況ではない。これまでの化合物半導体デバイスの研究の歴史をふり返ってみると、将来どのような部品が生き残るか正確に把握できずに部品を開発し、後から「それはなくても大丈夫」と言われる例が散見される。

そこで5Gや6Gといった分野で同じ間違いをしないように、図4-2-1を用いて次世代ワイヤレス通信システムの要求諸元から解説し、Massive MIMOの現状と課題、そしてブレイクスルーと言えるかどうか分らないが、新しい考え方を紹介する。私自身はMIMOの研究者ではないが、デバイス開発とシステム開発の境界領域で活動をしている。

まず次世代の要求諸元の超高速性について述べる。5Gでの通信速度は10Gbpsであり、ベストエフォートレベルで達成されているが、多くの人はこれが達成されたのはマイクロ波からミリ波へ周波数が上がったからであると解釈している。5Gで10Gbpsならば、次はテラヘルツ帯だから100Gbpsと言われている。正確には400ギガイーサとのシームレス化を目標に400Gbpsと考えるのが妥当だ。しかし、これはテラヘルツ帯からできるということにはならない。1Hz当たり何ビットが送れるかという通信容量は、Massive MIMOでは100bps程度まで来ている。したがって、100MHzの帯域があれば10Gbpsは送れ、6GHz以下の周波数だけで5Gは間に合う計算になっている。6Gになったときに、もし400Gbpsを目標とすると、同じ周波数利用効率を前提とすると4GHz幅のベースバンドの帯域があればよく、例えば2GHzから6GHzまでを全て6Gに割り当てられれば、そこで400Gbpsを達成してしまう。ところが、実際には既に別の用途でこの周波数帯が利用されているために、ミリ波帯の28GHz、39GHz、さらには別の発表では125GHzも登場したが、高い周波数を政策的に利用せざるを得ない状況になっている。高い周波数では帯域幅は広く確保できるが、そのときに4GHzの帯域で本当に済むのか、つまり高い周波数で高い周波数利用効率を確保できるかが大きな関心事となるが、現状では誰も答えていない状況である。

次に超多数接続について述べる。3GPPでは5Gにおいては100m²に1端末を想定している。各端末に指向性ビームを割り当てると仮定して半径100mの基地局で必要なビーム数を計算してみると、314ビームが必要となるが、これは公衆移動体通信ではまだできていない。将来6Gでは5Gの100倍の多数接続性が必要とされており、基地局のカバーエリアを極端に狭くして、ピコセルからフェムトセルにならざるを得ない。しかしLANの分野のWi-Fiでは半径10m程度の無線接続が各家庭で既に実現されていることを考えると、6Gは意外と目の前にあると考えることもできる。

低遅延性については、5Gでは1msと定めている。真空中の電磁波は1msの間に300kmしか進めないから、往復の片道分で150kmを越えると、他の遅延時間はゼロで接続できたとしても、結局150kmの範囲内しか成立しない。6Gの目標遅延時間は一時期0.1msという人達もいたが、最近は控え目になって1msとなっている。また、ローカル5Gが注目されているが、ローカル化したサービスではこのような低遅延が可能となる。以上が、デバイス部品サイドから見える概況である。

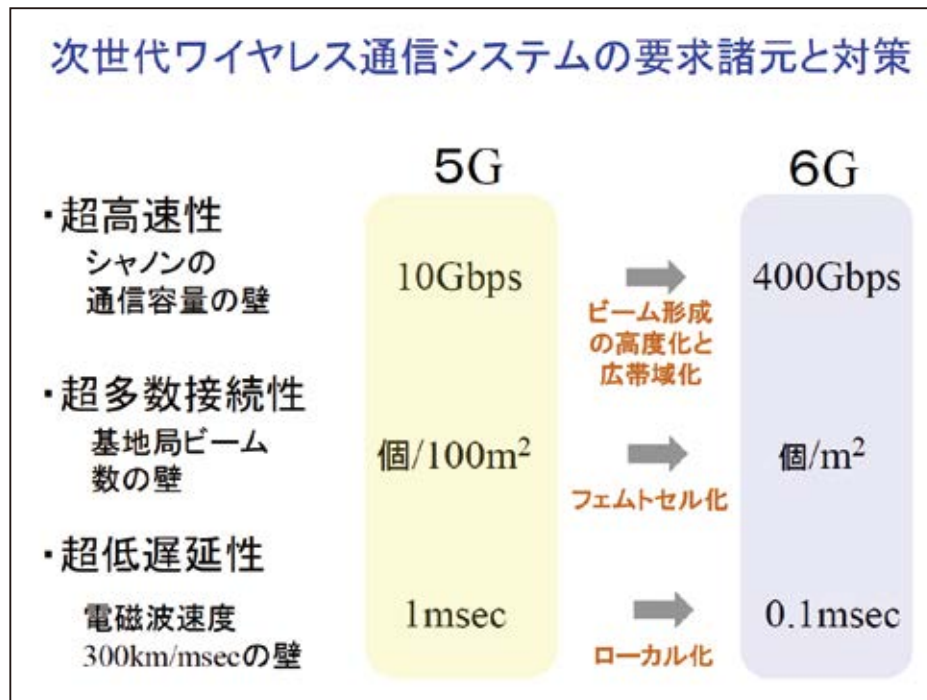


図4-2-1 次世代ワイヤレス通信システムの要求諸元と対策

最初の超高速性のところに戻り、Massive MIMOの原理を簡単に説明する。図4-2-2では、送信機が2個、受信機が2個あって、その間を伝達関数Hが結んでいる。この伝達関数は事前に測定しておく。10msに1回ずつ端末からサウンダーを発して、インパルス応答を求める形で測定される。受信信号Rから、 $HT=R$ という代数方程式を解けば、送信信号Tが求まる。代数方程式を解くには逆行列を掛ければよいが、Hというのは正方行列ではなく長方形列が一般的なので、左側のZero Forcing法においては、まず自分自身と転置を掛けて正方行列化し、それを逆にするという方法が取られる。右の特異値分解（SVD: Singular Value Decomposition）法は固有値分解法であるが、対角化された成分Dを正規化された固有ベクトルから成るUとVに挟んだ形で分解できる。そうする、図の右上で黄色くなった部分のように固有値分解（特異値分解）でき、直接ルートλで送信と受信がつながるようになる。ルートλのλはパワーゲイン（電力利得）に相当する。同軸ケーブルでつなぐと1になる。無線では、距離が離れると受信信号は100分の1、1,000万分の1というように減衰するが、普通に減衰した受信信号から固有値分解あるいは特異値分解をして固有モードを出しても、電力ゲインとしては非常に小さくなってしまう。一番望ましい方法は、強い受信信号が得られるように送信側で送信ウェイト信号を掛けるのがよい。これがMassive MIMOの基本原理である。

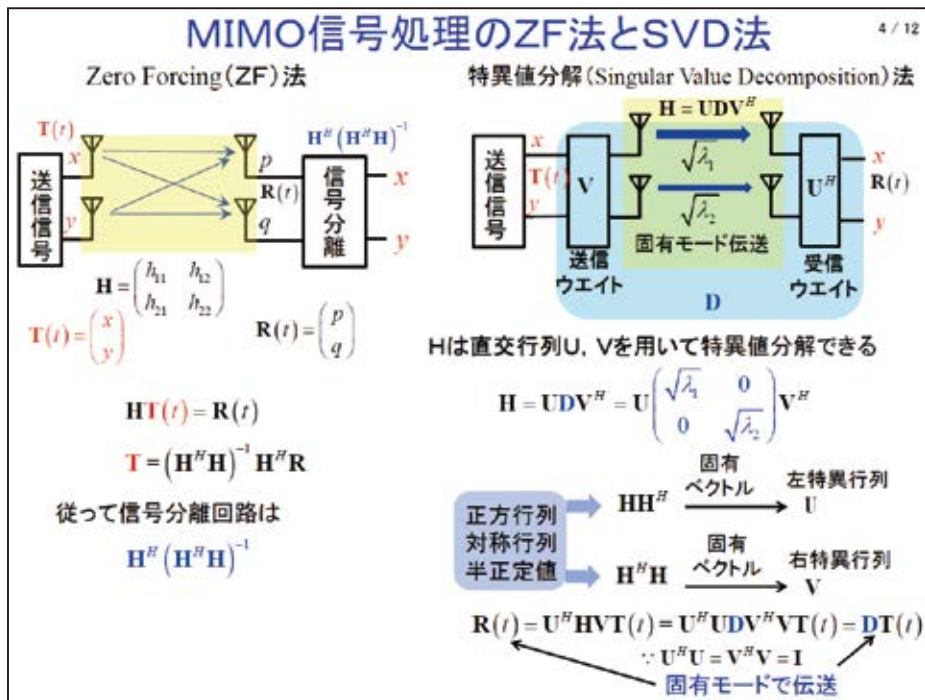


図4-2-2 MIMO 信号処理のZF法とSVD法

次にMIMOにおけるチャンネル容量の飛躍的拡大について説明する。図4-2-3の黄色部分の式はよく教科書に出てくるシャノンの定理である。信号と雑音の比SNRが関係するが、 2×2 MIMOの場合には、先ほどの特異値分解により2つの固有値でチャンネルを2本作ったので、2つをlogの項を加算するが、まとめると掛算になり固有値の積の項が出てくる。これがMIMOの寄与の項であり、基本的にビームフォーミングして、ビームを重ねて信号を強くした効果が見えてくる。 $N \times N$ のMIMOでは、logがN回加算されるが、logの真数は掛算で増えていく。

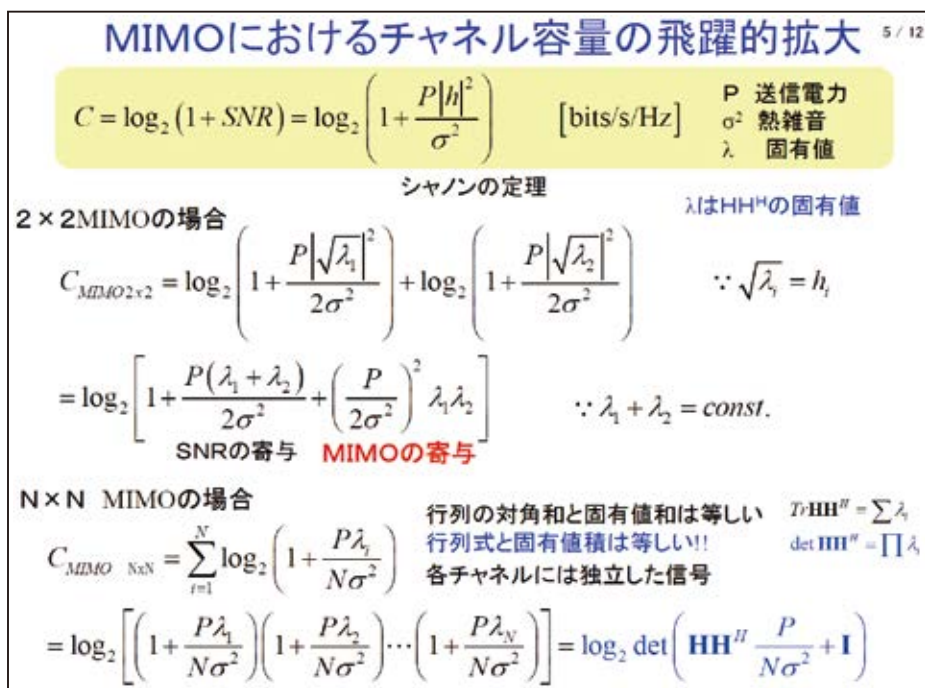


図4-2-3 MIMOにおけるチャンネル容量の飛躍的拡大

以上のことから、仮定を置いて整理すると図4-2-4の右下の式が導かれる。2年ほど前に電子情報通信学会で大鐘先生が解説しているが、送信アンテナ数とスループット（1Hz当たり何bps送れるか）の関係として、送信アンテナ数を増やすとスループットが増加する。図の左側のグラフで、現在の5Gを仮定して送信アンテナ数が50程度のところを読むと、100bit/(s・Hz)となるので、100MHzの帯域幅があれば10Gbps送れるということになる。送信アンテナ間に相関があると、スループットは低くなる。このグラフの計算の前提は、送信側相関係数が0.9、受信側相関係数が0.5としている。ミリ波でもテラヘルツ波でもこの程度の値であれば、今までの通信の理論をそのまま拡大していくことができる。

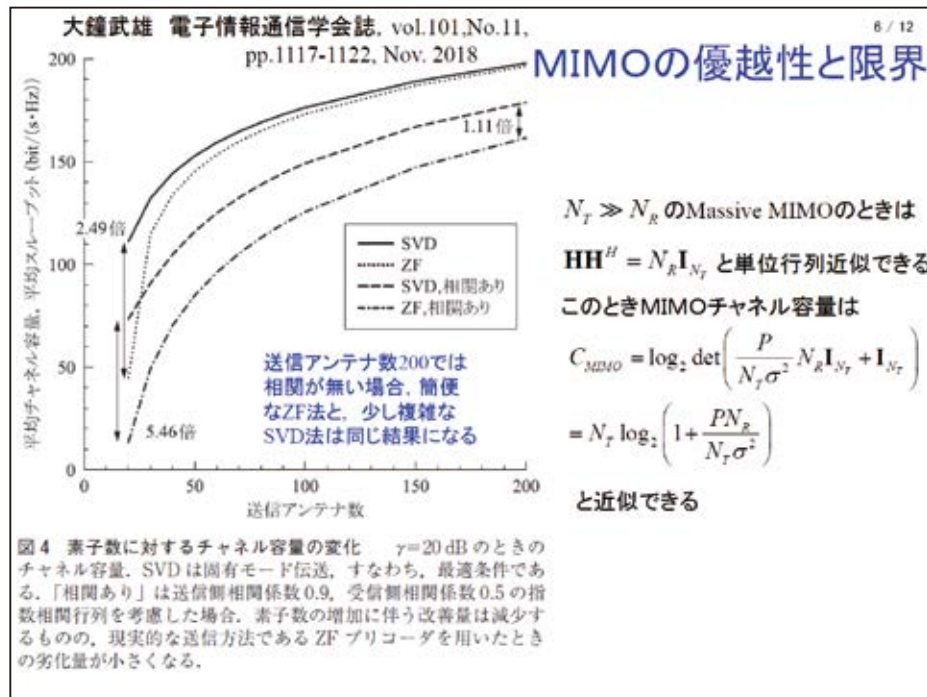


図4-2-4 MIMOの優位性と限界

このようなMIMOを実際に無線機に展開する場合の一例が図4-2-5のデジタルビームフォーミングである。送信データストリームは、ベースバンドでプリコード処理され、フェイズシフタを必要とせずに複数の送信アンテナから送信される。パワーアンプでは、入ってくる信号は振幅が全て異なるので、プレディストータ（歪補償回路）が全送信アンテナで必要となる。ここでは、送信側でD/A変換器が、受信でA/D変換器が必要となる。この変換器のおかげで非常にスマートなシステムを構成できる。実はこれらは高価であり、現在の日本では作れなくなっている戦略物資と言えるものである。5GではSub 6GHzの周波数で動作するデバイスであるが、ミリ波以上の高周波になるとどうなるのか見えていない。

ビームフォーミング技術としては、プリコード処理をデジタル部とアナログ部に分けるハイブリッドビームフォーミングもある。なお、アナログビームフォーミングは、40年前のフェイズドアレーレーダーのプロジェクトでも実施されていた長い歴史を持つ技術である。このように構成方法が変わると、要求されるデバイス性能も大きく変わる。

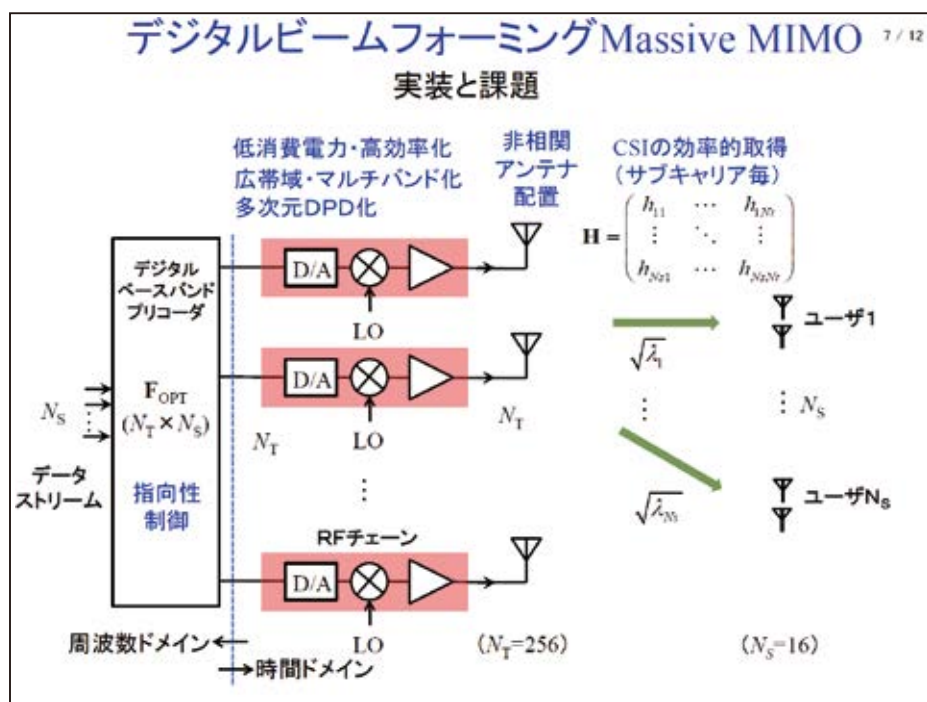


図4-2-5 デジタルビームフォーミング Massive MIMO

ところで、図4-2-2に戻ると、固有モード伝送の線の太さ（電力ゲイン）は様々である。ミリ波からテラヘルツ波に入ったときにこの太さがどうなるか正確にはわかっていないが、テラヘルツ波でも太いのではないかと期待されている。伝達関数行列式はその固有値の積に等しいので、一様な行列要素の行列式が零になってしまうことを勘案すると、本当は行列要素が一様になりやすいテラヘルツ帯では環境条件をしっかりと決めて検討する必要がある。例えば、反射板を置くかどうか、電磁波自体が広がらない性質を持っているものを使うとうまくいくか、エネルギーを集中できることで大きな伝達関数にならないかなどが気になるところである。

そのような検討の一つの例として、我々が4年ほど前に行ったループアンテナアレイを用いたOAM（軌道角運動量）の波の固有値伝送を紹介する。図4-2-6に示すように、大きさの異なるループアンテナが4つあり、いずれも12GHzで共振する。これを対向させると、大きいループに入れた信号は大きいループにしか出ない、小さいループは小さいループにしか出ないという現象を確認できる。送信アンテナも受信アンテナも、アンテナ間の相関係数はゼロになる。先ほどの普通のMIMOアンテナでは実現できないようなアンテナ間の非相関性を実現できている。これで伝送実験を行うと、不要波に対して20dB程度高い受信信号がループ径の同じアンテナからしか出てこないことが実現できた。パワーゲインも10分の1程度であり、普通のMIMOと比較するのは難しいが、かなり大きい値である。つまり、この実験系では、何も信号処理せずにMIMOの固有値分解ができていくということになる。プリコード処理等の複雑な処理なしに、周波数の利用効率を向上できている。

以上の説明で言いたかったことは、テラヘルツ波はセンサー、レーダーなどでも必要であり、研究開発をやらなければいけないが、通信に対して過度に期待するのはまだ危険だということである。6Gで本当にテラヘルツ波が全てだろうか。いざとなったら2GHzから6GHzまでの帯域を全て通信用にしてしまっ解決すべき課題かもしれない。RoFを使うときもテラヘルツ波にすることは必須ではない。RoFで送る無線信号を4～5GHzあたりにすれば、普通のスマホの受信機でその信号を受けられる。逆方向では、スマホの普通の無線機で返信したものを、張り出し基地局に相当するところで電子光変換すれば元に戻してくれる。あまり1つのことに囚われず、少し引いて広く見る必要があるだろう。最後に、我々はOAMの実験を4～5年やっており、

OAMが使い物になるかどうかは別にして、今後の取組としてどうすればよいか、かなりヒントになると思っている。

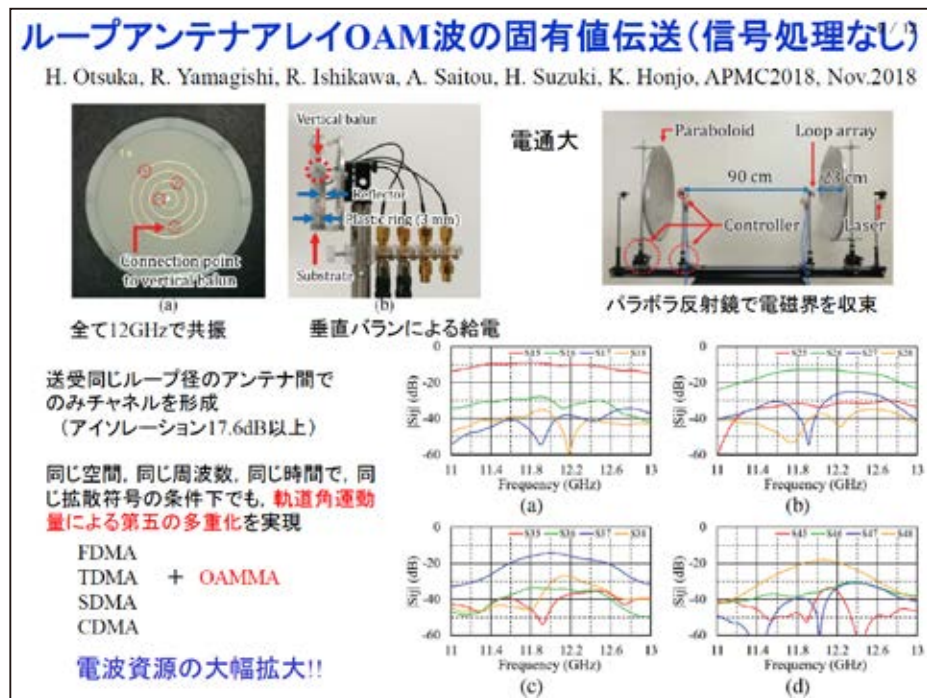


図4-2-6 ループアンテナレイOAM波の固有値伝送(信号処理なし)

【質疑応答】

- Q：このOAMは、近距離かつ対向で、軸もずれてはいけないというぐらゐのかなり微妙な通信に感じるが、実用化される目処はあるのか。
- A：軸は自分の直径程度はずれてもよいので、完全に一致する必要はない。6Gでラストマイルではなくラスト10メートルが必要な場合、軸の関係で秘話性があるものもよいと思う。OAMの波は周波数が低いほど広がるが、受信のアンテナの方を大きく配置するとその弱まった信号を強く合成できる。これも実用的な可能性がある。通信環境に反射板を置く解決方法だけではないと思う。OAMは様々な研究機関で我々の方法とは異なる方式で研究されている。ビームアンテナを使って信号処理によって軌道角運動量の電磁波を出す場合には、送信アンテナ間を非相関化するMIMOとの差はないのでないかという議論もあり、我々の実験は思考実験の一つと思ってもらってよい。
- Q：実験ではループアンテナを4本並べているが、このOAMの直交モードはこの半径で決まっているのか。
- A：小さい半径は定在波が1個乗って、その次の小さいループには2個乗っている。
- Q：その指向性は半径で決まっているのか。
- A：円錐型に出ていく感じで、昔から使われている通常のループアンテナの指向性と同じように広がっている。
- Q：アナログでやるところはよいと思うが、そのときに帯域はどうなるのか。
- A：帯域は共振器の帯域で決まっており、大体100MHz帯域幅である。ループ共振器の周波数を変えるとだんだん共振がずれてきてしまう。ここでは100Mサンプル/秒の信号発生器で16QAMをかけて1つのループ(チャンネル)に出している。100MHz帯域あれば先ほどのMIMOの説明のように相当やれるので、広い帯域が必要なわけではない。

Q：定在波ということは、ビーム自体は角運動量を運んでいないという理解でよいか。

A：そうではない。信号は進行波として右回りと左回り、つまり直交する $+jm\phi$ と $-jm\phi$ であり、それを足した縮退直交モード（コサインとサイン）になってQAM信号になる。

Q：プラス1とマイナス1の重ね合わせを飛ばしているということか。トータルではゼロということか。

A：そのとおりである。その意味では、位相は一定という形になる。

4.3 THz メタサーフェス技術

真田 篤志（大阪大学）

ドイツのフラウンホーファー研究所の実験で、140 GHz帯の電波を使って100メートルの通信に成功しているが、これは見通し通信である。ミリ波通信を実際のネットワークに組み込む場合、ベースバンドユニットと端末との間に使うことになると思うが、必ずしもこの見通しが取れるとは限らない。実際の環境中では取れないことの方が多いだろう。そのため、1回反射させる、あるいは電波が通り抜けられる物体（クロッキング、透明マントなどと呼ばれる）を使う、などの対応が必要になる。

これらのような、自然の材料が示さない特性を示すデバイスが、メタマテリアルやメタサーフェスである（図4-3-1）。それらを実際に作ることができれば、極めて高い電波の制御を実現することが可能になる。例えば、特定の方向へ電波を反射するためには異常反射（入射角と反射角が違う反射）が有効である。その異常反射において、不要な反射を完全に消してしまって100%所望の方向にだけ送れるようにしたい。さらに、動的に制御することが可能であれば設置の自由度が高くなる。加えて見た目の美しさも重要である。

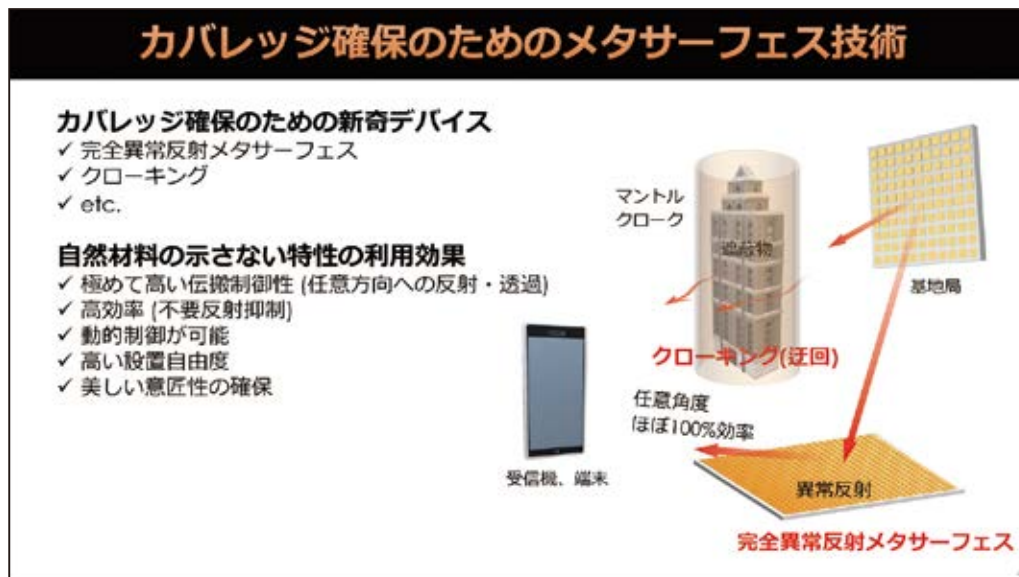


図4-3-1 カバレッジ確保のためのメタサーフェス技術

これらの特性を持つ物質を、メタサーフェスを用いて実現するための研究開発が既に行われている。NTTドコモは、2018年に国内でメタサーフェス反射板を使って5G通信エリアを拡大する実証実験に成功しており、タイ・バンコクでも実環境での実証実験を行った。電気興業も2021年5月にメタサーフェスを使って5Gカバレッジエリア拡大の実証実験に成功している。また、NTTドコモが発行した6Gホワイトペーパー（https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/）にも記述があるように、メタサーフェスによる反射、透過、集光を使って通信エリアの拡張を実現するための研究開発が進んでおり、どのように活用するか検討も進んでいる。KDDI総研でも、28GHz帯と39GHz帯の2つの周波数帯に対して働く透明メタサーフェス反射板の開発に成功しており、5Gカバレッジエリア拡大に向けた実証実験が行われている。ただし、このデバイスの反射特性を見ると、不要な放射が十分に抑えられていない。電波の強度低減を抑えるために、所望の方向への反射効率を向上して100%に近づけるといった技術的課題は依然として残っている。

さらに、動的な制御も必要になる。2021年10月にKDDI総研とジャパンディスプレイが共同で、液晶のメ

タサーフェスを作って反射の方向を動的に変えることを目指した実証実験を行っているが、まだ性能の詳細は明らかにされていない。個別のデバイスを周辺環境に合わせてアダプティブに動かすという方向性もあるが、複数のデバイスをネットワーク的につなぎ、全体として動かして利用するという方向性もある。後者の方向性についても検討していくべきだろうと考える。

我々のグループで行っているD帯（140GHz）での完全異常反射メタサーフェスの例を紹介する。入射の角度と反射の角度が異なるものを異常反射と呼ぶが、これをどうやって実現するか。単純に考えれば、局所的な反射位相勾配、入射波と反射波の位相の差を与えるような構造体を置けばよさそうであるが、実は局所的な勾配を与えただけだと必ず不要な反射が起こる。異常反射がマクスウェル方程式の境界条件を満足しないことが原因である。入射波と反射波の角度差が大きくなるにつれ、所望以外の方向への反射が起きて効率が低下する。図4-3-2のグラフは、局所的に位相勾配をつけたメタサーフェス（下側のオレンジ色部分）に正面方向から電波を照射して反射をシミュレートしたものである。所望の方向（入射波に対して右側70度方向）に反射波ができていますが、正面方向に戻る成分も含めて、それ以外の方向への反射が起きている。このシミュレーション（70度）の場合、入射波電力に対する所望の方向への反射電力の比は76%であり、24%分の電力が他の方向に反射されていることになる。

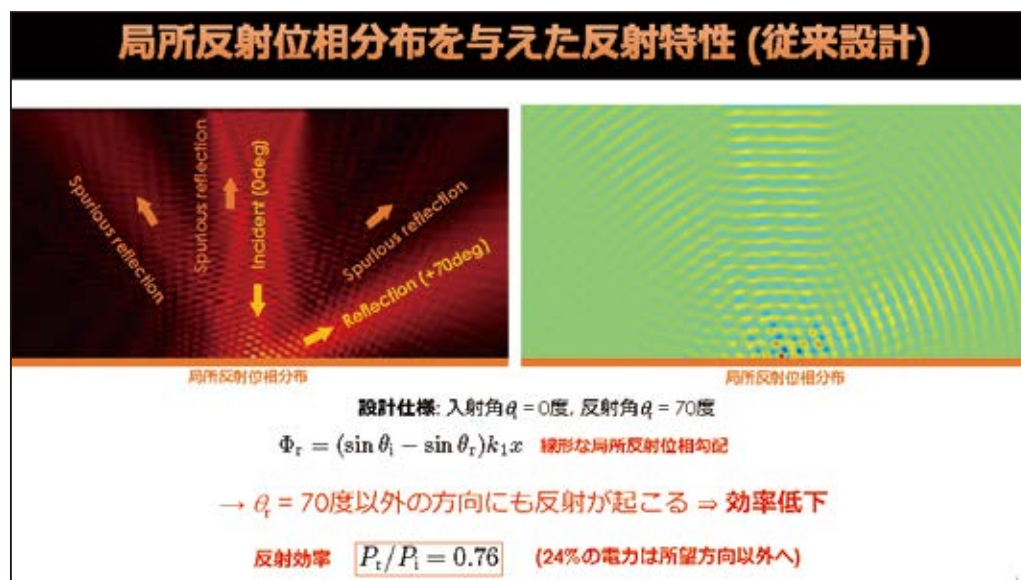


図4-3-2 従来設計の場合の反射特性

これを改善するために様々な取り組みがなされてきたが、所望の方向に100%反射できる手法が確立されつつある。面内伝搬波、すなわち面内で伝搬する波を利用する。反射面内に電力が余剰、あるいは欠乏している部分が存在し、それらが不要な反射を形成しているため、それを基板の中で融通できる設計を行う（図4-3-3）。この設計を非局所利得－損失設計と呼んでいるが、局所的ではなく非局所に電力を融通する設計である。この設計には非常に負荷の高い電磁界計算が必要になるが、最先端のコンピュータを使うことで最適化が可能である。

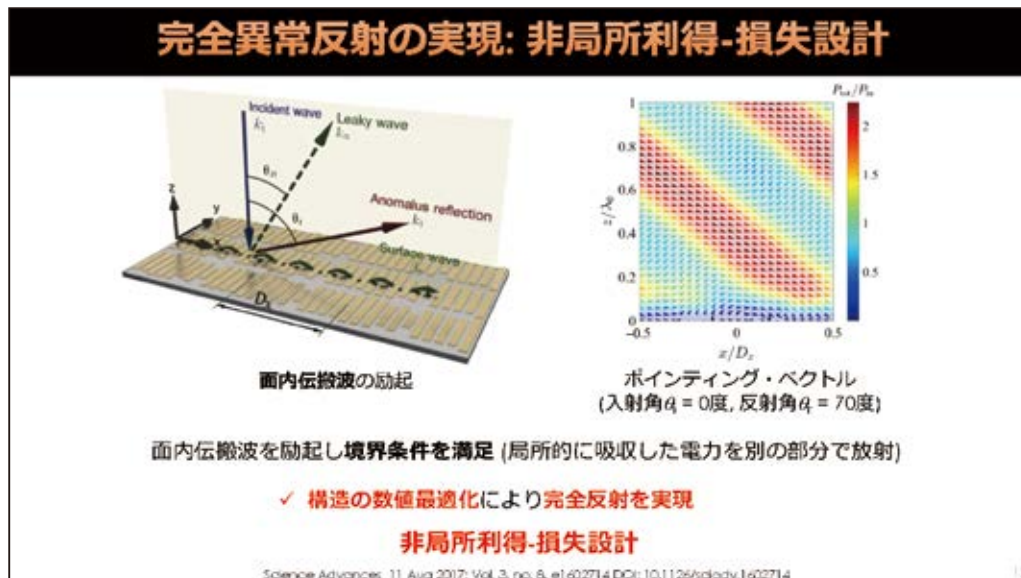


図 4-3-3 完全異常反射を実現するための非局所利得 - 損失設計

このような手法を用いると、不要な反射を除去し、所望の方向にだけ反射させることができる。この反射を完全異常反射と呼ぶ。基板内部での誘電損失や導体損失は避けられないが、完全異常反射を実現することで反射効率を向上させることができる。

メタサーフェスに垂直方向から入射される 8GHz の電波を 70 度方向に反射する場合、従来設計における理論限界は 7 割程度であるが、非局所利得 - 損失設計を用いると 94% の反射効率を実現できた。すなわち、ほぼ基板の内部損失だけという状態が実現できる。逆に言うと、ミリ波などでこのようなデバイスを実現する場合、使用する材料が効率を決める。材料特性の計測・評価や、それに基づいた材料選びが重要になってくる。

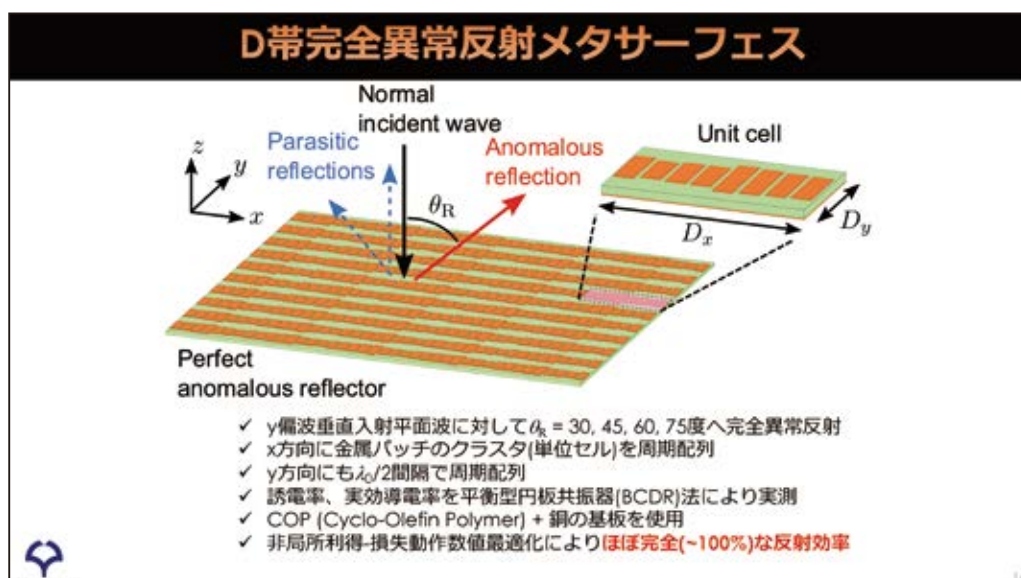


図 4-3-4 D 帯で完全異常反射を実現するメタサーフェスの構造

図4-3-4は我々のグループがD帯（140GHz）に対して設計した完全異常反射メタサーフェスである。既存のフォトリソグラフィを使って実現可能なサイズの金属を並べ、配列周期を最適化した。使った基板はCOP基板に銅を張りつけたもので、100ミクロン程度の厚みである。通常の製法でつくれるもので、非常に安価に製作できる。

図4-3-5の左図はレーダ断面積で、正面から140GHzの電波を入射したときにどの方向に電波を反射するかを計算した結果である。黒線は最適化していない場合、赤線は60度に反射するように最適化した後の結果である。最適化により、所望方向以外への反射が全て抑制され、60度方向に電力が集中できている。この条件では、基板内部の損失を除き、反射効率が最適化によって99.9%にまで向上している。

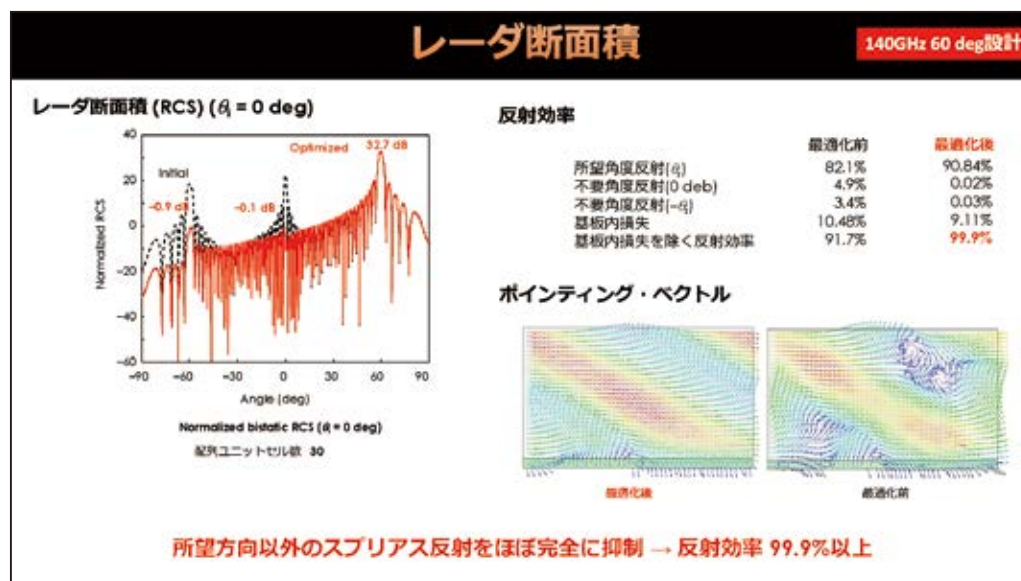


図4-3-5 最適化前と後のレーダ断面積のシミュレーション結果の比較

誘電率を変えた場合の計算も行った。誘電率が10%もずれると反射効率が2割程度低下する、という結果となった。この計算は140GHzの周波数で行っているが、材料物性に対する高精度な測定が必要だということがわかる。従来は、いくつか試作してみていいものを選ぶということをやっていたが、正確な誘電率データを取得することが可能になると、試作回数を劇的に減らすことができるようになる。

図4-3-6の左のグラフは、我々が設計したデバイスの反射効率をシミュレーションした結果である。赤丸が最適化したもの、青丸が最適化していない段階でのものである。反射角度が大きくなると反射効率が低下する傾向があるが、それでも最適化によって高い反射効率を確保できることがわかる。図4-3-6の右のグラフは、最適化したデバイスについて電力損失を損失要因ごとに分離した結果を示している。青が基板内部の損失、赤が不要な反射による損失を表している。大半が基板内部の損失という状態にまで追い込めていることが示されている。

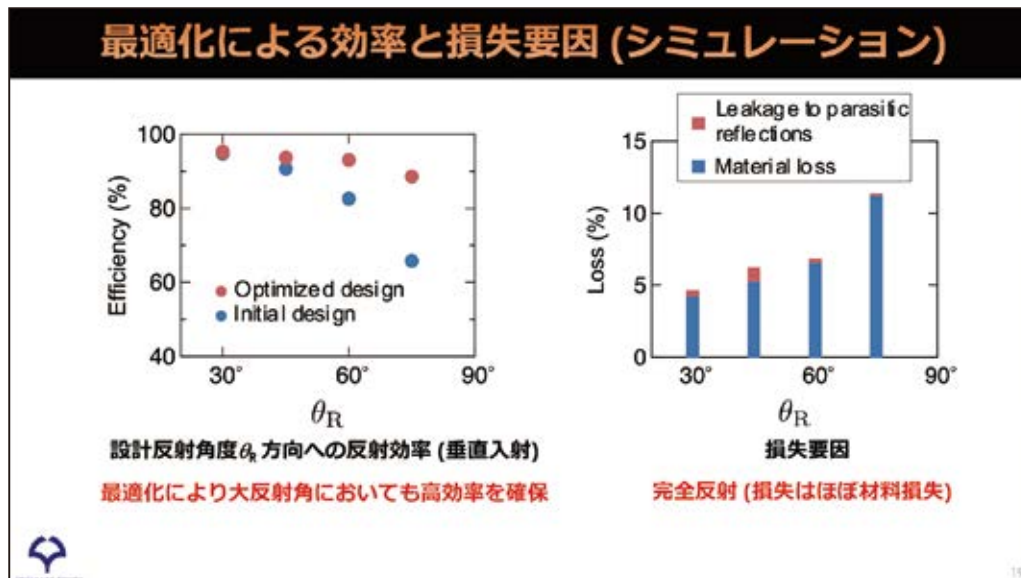


図4-3-6 最適化による反射効率と損失要因

以上、完全異常反射メタサーフェスを実際につくることができる、ということを示した。我々のグループは140GHzの周波数で設計し、その実証実験を行っている。今後は同様の取り組みを220GHz、300GHzにも展開する。また、デザインのための計算時間が非常に長くなるため、材料とデザインをセットでデータベース化していきたい。さらに、動的制御の実現も目指している。

最後に今後の展望について述べる。リコンフィギュラブル・インテリジェント・サーフェス (RIS) と呼ばれるデバイスの開発が各地で行われている (図4-3-7)。メタサーフェスとしては第3世代 (インテリジェント反射板) と呼ばれるデバイスであるが、ネットワークに接続することで協働的に動作させ、伝搬環境を動的に制御する試みが進んでいる。



図4-3-7 展望: リコンフィギュラブル・インテリジェント・サーフェス (RIS)

図4-3-7の右上の棒グラフは論文数の年次変化を示している。メタサーフェスは赤線、インテリジェントサーフェスは緑線である。メタマテリアルという分類の中でメタサーフェスは少し後発の分野であるが、その中でもインテリジェントサーフェスが2020年頃から立ち上がってきている。

【質疑応答】

- Q：メタサーフェスの場合、共鳴構造を利用するイメージがあり、動作周波数が限定的になる印象を持っているが、実際はどのようなになっているのか。
- A：メタサーフェスでは共鳴は使わない。そのため、非常に広帯域で動作するものが多い。
- Q：帯域幅はどの程度か。
- A：比帯域で言うと、16%とか20%といった値が得られている。
- Q：より広帯域にならない理由は何か。
- A：反射の場合、自由空間の波長と基板の中の波長の関係性によって決まる部分がある。また、効率を上げようとするとき微細な配置を制御することになるが、それが帯域を狭めることにつながる。すなわち、効率と帯域はトレードオフの関係にある。
- Q：メタサーフェスを実際に使用する場合、当初は固定のメタサーフェスを設置するだけだが、将来的にはそれが自動で動くようになる、という理解でよいのか。屋外に設置する場合、ビルの側面とかに全面設置されるようなイメージか。
- A：そのとおりである。最初は固定型のデバイスでどこまで効率が上がるか、という研究開発をやっていたが、自動で設定できる方が望ましいので、次の目標は動的デバイスに置いている。基本的に、ターゲットとなる送信・受信先が決まると、設置場所はある程度限定されると想定しているが、若干の調整のために動的デバイスを置く必要があるだろう。ただし、例えばサーフェス自体がネットワークにつながるようになると、状況が変わる可能性がある。様々な場所に動的サーフェスを設置しておいて、個々のデバイスの向きを協働的に変えとか、二重に中継していくとか、そういったことはあり得るだろう。
- Q：動的なメタサーフェスはどの程度の制御が可能か。例えば液晶を使った例があったが、反射の角度としてどの程度、制御できるのか。液晶を使う方法以外にどのような方法の実現可能性が高いか。
- A：液晶を使った例の場合、データが公表されておらず不明である。我々のグループでは、例えば $\pm 30 \sim 75$ 度ぐらいの範囲で動作するのは確認できている。液晶以外の方式では、例えばバラクターダイオード、PINダイオードのようなデバイスを用いて電氣的に制御する方式や、伸縮可能な基板の上につくり伸縮によって角度が変わるといったデバイスもあり得る。実際の使用環境では、後者の方が使いやすいかもしれない。

4.4 無線・光融合に向けた異種材料集積光回路技術

西山 伸彦（東京工業大学）

以前より異種機能集積と異種材料集積という2つの軸を持って、それを組み合わせることであらゆる材料を活用して光、電子、無線のシームレスな融合の実現を目指している。ここでは、まず接合の話をした後、大規模光集積回路、オンチップ光配線に向けた取組を紹介したい。

2030年頃に6Gが出て、しばらくした社会がどのようなになっているのかを想像すると、個人にカスタマイズされた大量のデータが流れる社会となり、あらゆるところで計算や通信リソースが必要になっていると考えている。コロナ禍以前の調査であるが、通信トラフィックは2035年に向けて急激に伸びていく。注目したいのは、コンシューマーのほうの伸びが大きいことである。光技術は大陸横断からサーバのラック間通信までが既に実用化されており、今後も、より高速で多機能性を求められている。一方、ボード間やLSIの配線、さらにオンチップの光配線は研究開発中であり、特にキーになってくるのはシリコンとの互換性である。距離は短くなるが、低消費電力性やデバイスサイズの縮小がポイントである。

異種材料集積という観点からは、III-V族フォトニクスとシリコンフォトニクスという2つのフォトニクスの材料があるが、例えばIII-V族のInPやGaAsの屈折率は、コア材料（GaInAsP）が3.4、クラッド材料（InP）が3.17である。一方、シリコンフォトニクスではコアがシリコンなので、屈折率が3.45、クラッド（SiO₂）が1.45であり、III-V族フォトニクスよりも大きな屈折率差がある。III-V族は化合物半導体なので、材料組成を変えることで波長を変えるなど、様々なエンジニアリングが可能になる。このため、光学的物性値をうまく選択することでレーザや増幅器が作製可能であり、世の中に光通信の光源や受光器を供給している。しかし、材料が柔らかいこともあり基板が大型化できない。また材料費が高いという問題も抱えている。シリコンフォトニクスは大きな屈折率差により光を強く閉じ込めることができ小型化が可能であり、CMOSプロセスとの互換性による大量生産が可能である。将来的には光電子融合回路が実現可能で、大規模集積回路も期待できる。ただし、光利得など光学的物性値が必ずしもよくないので、半導体レーザなどはシリコン材料で実現できない。

以上を踏まえると、いいところ取りが必要である。さらに単純に「1 + 1」ではなく、うまい組合せをすると2以上になるというのが異種材料集積の利点である。そのためには、まず材料を接合する技術が要る。ハンダでつけることもできるが、光は金属材料が使用できないので、間に何も入れないやり方、もしくは透明な材料でつけることがポイントになる。アプリケーションによって、図4-4-1に示す様々な接合技術を使い分けている。特に大規模集積回路では右下の小片接合を利用し、大量のチップを大きなシリコン基板に接合する。ここではツバメのマークが小片接合でできているが、このような技術を使って大規模光回路の実現を目指している。

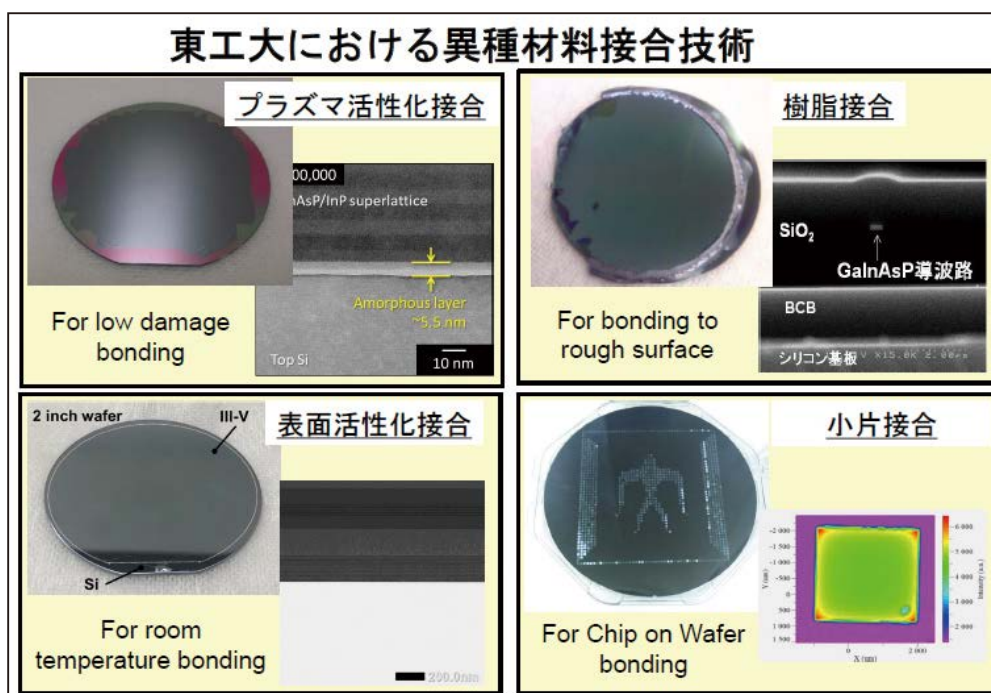


図4-4-1 様々な異種材料接合技術

図4-4-2に異種材料集積技術を利用した大規模光集積回路を示す。パッシブ素子はシリコンフォトニクス、光素子やアクティブ素子はIII-V/Si異種材料集積で作製し、DSPや電子アナログドライバーなどの電子回路を乗せることによって、ワンチップで超広帯域大規模光トランシーバの実現を狙っている。

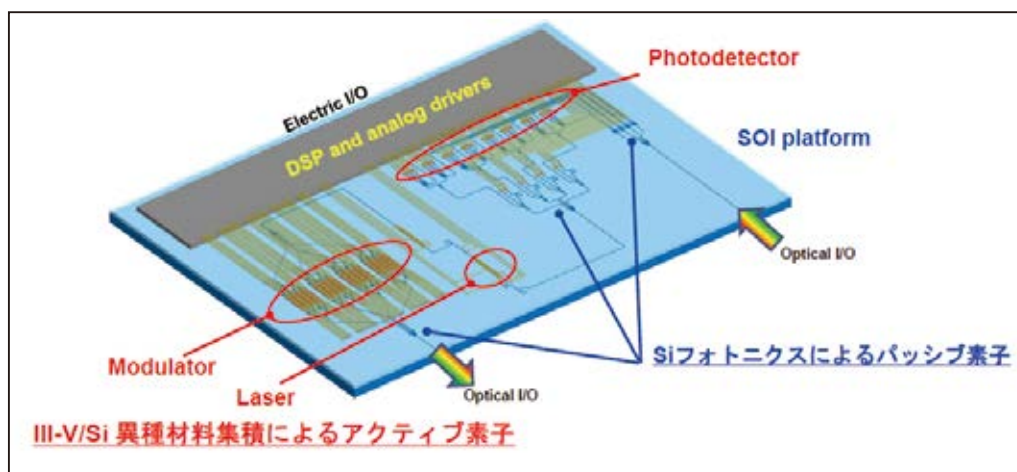


図4-4-2 異種材料集積技術を利用した大規模光集積回路

実際にアクティブ素子を集積した電子顕微鏡写真を図4-4-3に示す。シリコンとIII-V族半導体とのハイブリッドになっており、レーザ発振を起こす。右側にシミュレーション結果を示すが、サブミクロンの構造をつくることで光学的に異種材料を一体化するデザインが可能となっている。SOI基板上にシリコンフォトニクス回路とハイブリッド集積することで、レーザ、増幅器、受光器などのアクティブ素子形成、ワンチップ集積が可能になっている。

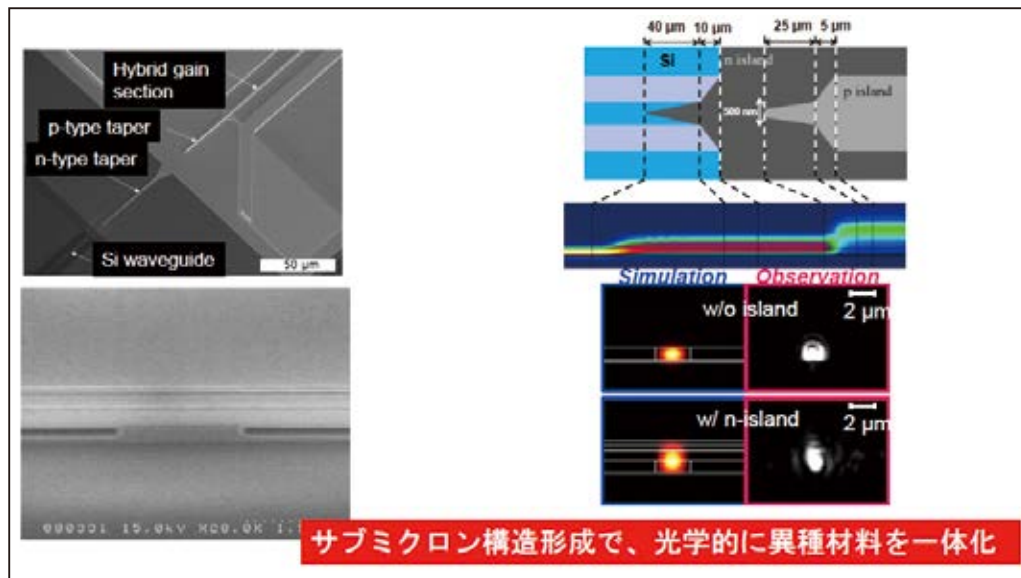


図4-4-3 SOI基板上のアクティブ素子集積

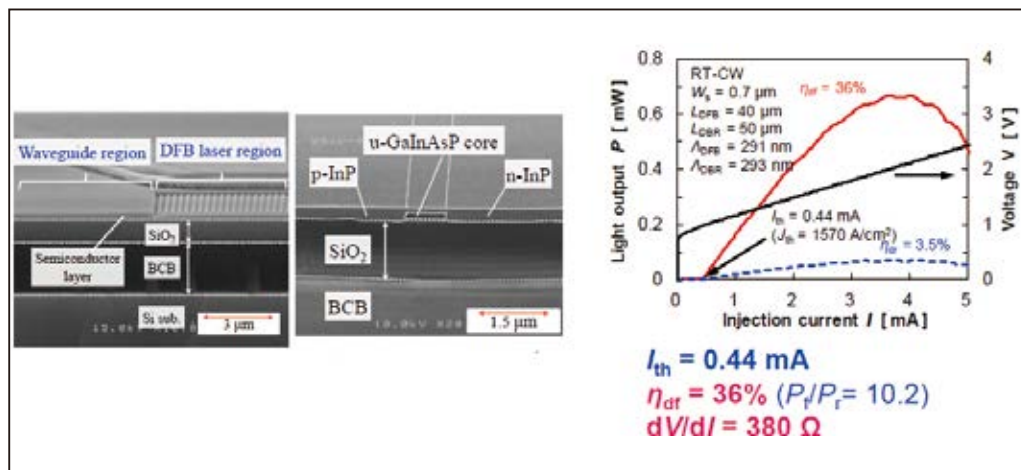


図4-4-4 メンブレン光集積回路の電子顕微鏡写真とレーザ発振特性

一方、LSI配線などの短距離通信では小型低消費電力レーザが必要である。そのためのメンブレン光集積回路を提案している。これはIII-V族の半導体層を非常に薄く（数百nm）して上下を空気やガラスで閉じ込める。つまり、シリコンフォトニクス屈折率差をIII-V族の半導体に適用するというものである。III-V族半導体の中心光が強く閉じ込められるので、通常のレーザの3倍の光閉じ込め係数を実現することができ、わずかな電流でレーザ発振を起こすことができる。図4-4-4の左側にSEM写真を示すが、ここでは導波路に対し回折格子が縦に切っている。電流は上下に流せないで横から流す。右側に特性を示すが、しきい値が0.44mA、最近では0.2mA以下というのも実現できている。光が非常に強く閉じ込められているので、物理的に小型なことが特徴である。さらに、わずかな電流で大きな帯域のデータ伝送を行うことができ、1mAのバイアス電流で20Gbpsの伝送を実現することができる。これはデータ伝送のエネルギーとしては98fJ/bitと非常に小さいエネルギーを実現できている。同じようにやれば、受光器もつくれる。

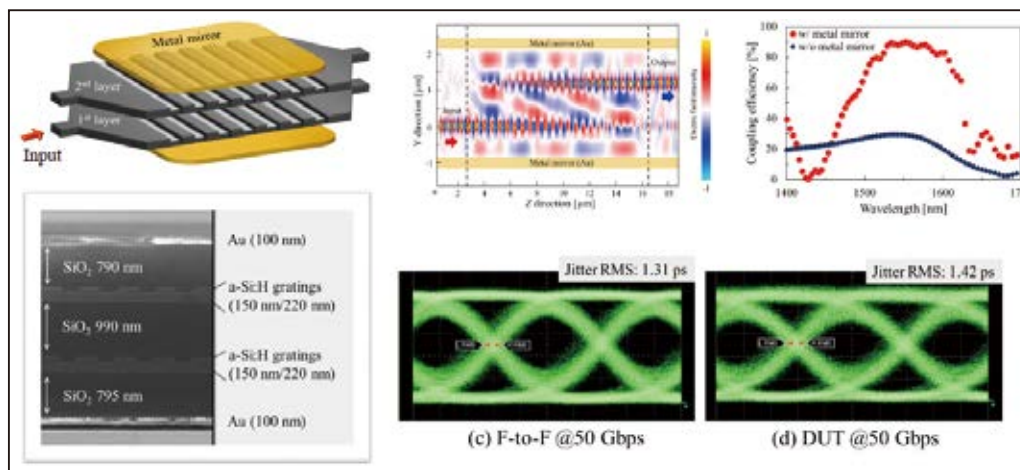


図4-4-5 多層光配線

メンブレン光回路はⅢ-V族だが、LSIの上に乗せようとする図4-4-5に示すように光の配線も多層化しなければならない。これが電気の配線に比べて難しいところで、電気の配線は金属を這わせればできるが、光では縦方向への接続は難しいので、グレーティングカップラーと回折格子のペアを使い、LSIでよく使われているダミーメタルプロセスを流用することで、上下にメタルミラーを設けることを提案している。80%程度の結合で50Gbps程度の信号を下の層から上の層に出すことができるようになっている。

ここでテラヘルツの話題に触れたい。図4-4-6は光信号→テラヘルツ信号変換と呼ばれるものである。左上はGaInAsの比誘電率の式である。光を当てると自由電子が発生するので、半導体を金属化することができる。通常はテラヘルツに対してはほとんど透明だが、キャリアを発生させることによってテラヘルツに対してブロックするシャッターの役割を示すことが分かっている。これは1THz～2THzで非常に良好なブロック特性を有することが理論的に分かっている。実際にバルク半導体によって原理検証したが、光の「1・0」の信号をテラヘルツの「0・1」の信号に変換できることを示した。このような技術を使うと、テラヘルツ用のRTDなどを用いてCWのテラヘルツ発振し、導波路のシャッターでテラヘルツ信号に変換して外に飛び出させることが可能となる。最終構造はまだできていないが、導波路単体の測定はNICTの施設を利用して成功している。

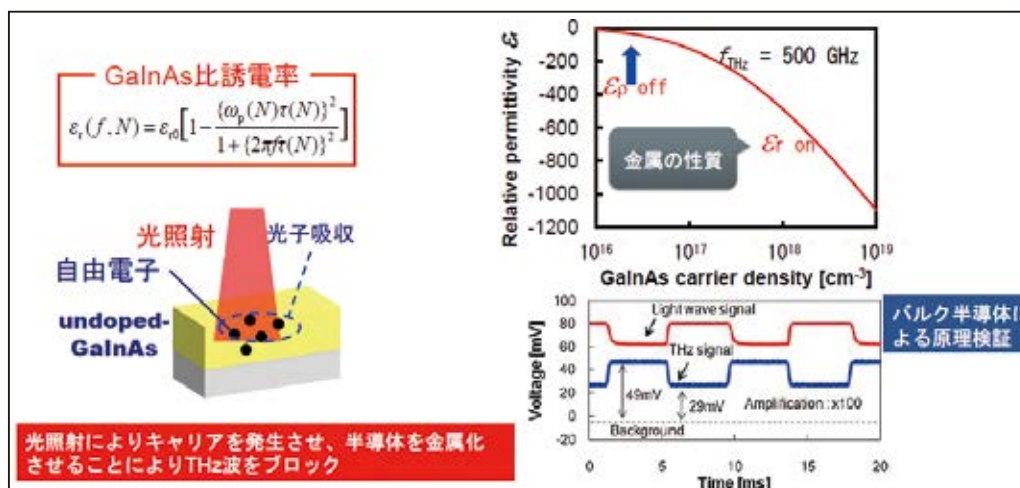


図4-4-6 光信号-THz信号変換

メモリ帯域に比べてネットワーク帯域は非常に遅く、狭い。これを2030年代に到達する10Tbps程度のメモリ帯域と同じにすることによって、メモリとの連携もうまくいく。その場合は、DSPが重要になる。現在の光トランシーバは光部分ではなく電子回路が大きな消費電力を占めている。これを解決するために、大規模光集積と電子回路を一体設計することによって消費電力を低減したい。電気と光のボーダーを変えて、電気の仕事を光にオフロードしてやることで、電気回路が消費する電力を下げる可以考虑しており、PETRAのNEDOプロジェクトの中で行っている。オンチップという観点からは、LSIをさらに速くするために、LSIのグローバル配線層を光回路に置き換えることでトランジスタの高性能化をLSIの高性能化につなげることができると考え、研究を行っている。

最後にまとめる。異種材料集積技術は高い歩留まりで接合できる段階まで進歩している。それを利用することでテラビット時代の高帯域トランシーバや100fJ/bit以下のエネルギーコストで信号伝送ができるようになってきている。

この分野をますます発展させることに関して、ものづくりの観点からコメントしたい。日本の大学は物性研究者が多いが、デバイスまでいかない、もしくはいけないケースが多い。その理由の一つに、すぐ近くに装置がないという問題をあげたい。もちろん産総研やNICTの拠点に大型装置を入れることも重要だが、全体の装置導入レベルの底上げが必要である。例えば、半導体の産業界では当たり前のi線ステッパは日本の大学には数台しかないと思う。これを国家予算だけに頼ることは難しいので、企業の寄附にも期待したい。海外では、インテルやASMLなどの中古装置が様々な大学に存在している。日本の中古装置はすぐ売られて、中国に行くケースが多い。以前、ある企業の経営者は、日本で多くの寄附をすると「それだけ儲けているのなら税金を払え」ということになると言っていた。もしかすると、うまく税制を変えてやることによって企業の寄附が多くなり、日本の大学全体のものづくりのレベルが上がるのではないかと考えている。

【質疑応答】

Q：消費電力の関係で光の役割を大きくすることについて具体的に取り組みは何か。

A：例えば多値変調をつくり出すとき、通常はデジタル信号をドライバーでアナログ変換して変調器に入れるが、デジタル信号を光変調器に直接入れて多値化を実現すると、アナログのドライバーが不要になり消費電力を低減できることなどがある。

Q：アナログ応用を踏まえ、光源、変調器、フォトダイオードなどのコンポーネントの性能、集積化はどうなっているのか。

A：フォトダイオードはできている。またレーザのほうもだいぶできているが、変調器が一番難しい。このため、今後は変調器の開発を頑張っていかなければならない。

C：誘電体のテラヘルツ回路の話もあり、それとの融合もうまく進むのではないかと感じた。

Q：ボンディングの種類をそれぞれ応用によって使い分けしているとのことだが、最後は小片接合が良いということか。

A：シリコンの300mmウェハに対してIII-V族は小片接合でやらざるを得ない。プラズマ活性化接合に対し、表面活性化接合はプラズマ活性化によるダメージが少ないが、熱をかける必要がある。熱に弱いものなのか表面ダメージを気にするのかで使い分けしている。

Q：中古装置を様々な大学に入れたらよいとのことであったが、装置が入ることも重要だが、管理するテクニシヤンの確保も重要ではないか。

A：その通りである。

Q：チップの中に光配線を入れるという話があったが、もしこれができたらコンピューティングアーキテクチャも変わってくるので、非常に興味深い。チップの中で光電変換をやると思うが、消費電力やレイテンシーなど気になることもあり、コメントがほしい。

- A：チップの消費電力の面では、光デバイスの消費電力が下がれば下がるほど小さくなっていくので、まずは光デバイスの消費電力を下げるのがポイントである。一番の問題は、我々自身でLSIをつくれないので、それが本当にできるのか実証できないことである。LSIをやっている人には電気で頑張ると言われてしまうので、何とか説得しようとはしているが、そこが大変難しい。
- Q：世界を見たときに、このようなことを実現したところはあるか。
- A：メンブレンではないが、LSIの中に光を入れることは、ヨーロッパやアメリカでも盛んに行われている。
- Q：開発した技術のテクノロジートランスファーをするにはどこかの装置メーカーと組むことが重要だと思うが、どのような状況にあるのか。
- A：既にNEDOプロジェクトでは、PETRAの中で企業にトランスファーさせている。メンブレンのところも最近流れが変わってきている。ものづくりを一旦捨てた人たちも、やはりものづくりがないと今後はないと感じ始めて、一緒にやらないかと言いだしており、回り始めているように思える。

4.5 高周波材料特性評価技術

加藤 悠人（産業技術総合研究所）

様々なデバイスやハードウェアの開発基盤となる計測技術に関して、中でも特に高周波材料特性計測（Beyond 5G/6Gの材料設計に求められるミリ波帯材料特性評価、産総研で開発した超広帯域材料特性評価技術、評価技術の国際標準化・製品化）に焦点を当て、産総研の技術開発と取り組みを紹介する。

5Gではミリ波の特に低い周波数が使われ始めており、6Gの中では100 GHz超の高い周波数のミリ波が使われようとしている。それに当たり、高い周波数帯で使える低損失材料が必要となるので、ミリ波帯での計測技術が必須である。材料計測ニーズの背景には、低損失化のための材料・プロセス開発がある。高周波回路の誘電損失や導体損失は一般に周波数が高くなると増大してしまうので、デバイスの低損失化に向けて、低損失の材料・プロセスの開発が必要不可欠である。アンテナや回路、メタサーフェス反射板において、損失を決めている材料パラメータは、①「誘電損失」を決める複素誘電率、特に誘電正接（ $\tan \delta$ ）、②「導体損失」を決める導電率であり、低損失化に向けた最適材料・プロセスの選定に当たっては、材料パラメータの高精度な把握、特に、ミリ波帯での誘電率や導電率の高精度な計測が必須となる。

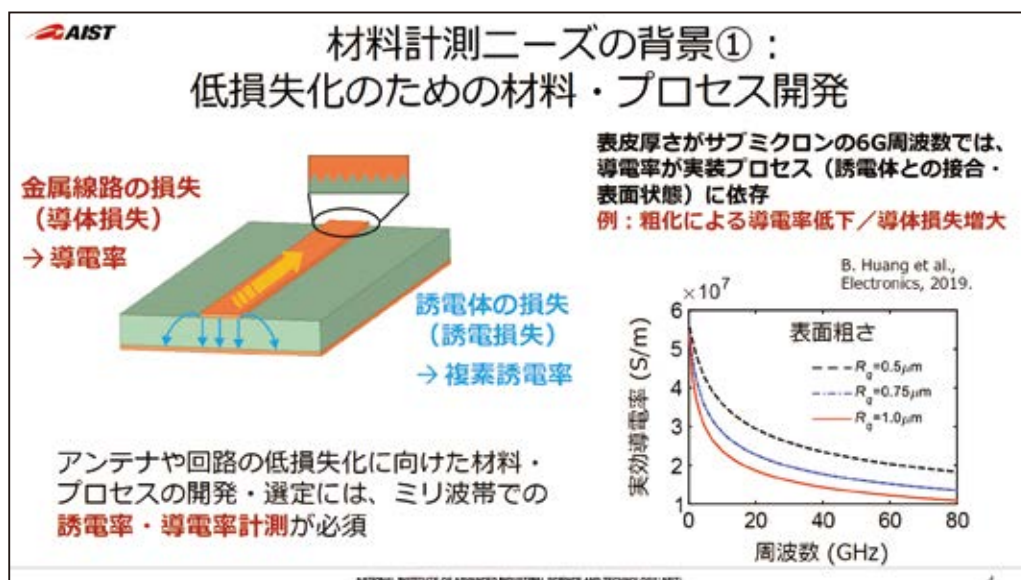


図4-5-1 材料計測ニーズの背景①：低損失化のための材料・プロセス開発

6Gで使われるような100 GHz超のミリ波では導体損失の寄与が支配的である。これは、6Gの周波数では表皮厚さがサブミクロンのオーダーとなり、表皮厚さと表面粗さが同程度となるからである。これにより、実効的な導電率は表面状態に強く依存し、一般にマイクロ波帯の値よりも大幅に低下する。従来は、金属線路と誘電体を張り合わせるに当たって、接着性を高めるために表面を荒らすこと（粗化処理）が行われてきた。しかし、粗化処理をして表面が荒れてしまうと、図4-5-1に示すように6Gの周波数では導電率が低下し、それに伴って導体損失が増大してしまうので、金属と誘電体を平滑に張り合わせる表面処理技術などが必要となる。つまり、実装プロセスの技術開発を効率的に進めるに当たっては、「各プロセスにおけるミリ波での導電率の高精度な把握」が必須となる。



図4-5-2 材料計測ニーズの背景②：設計の高確度化

図4-5-2に示すように、様々なアプリケーションの中で、多くのデバイスや部材、アンテナやメタサーフェスや回路が使われている。これらの構造設計は、使用する材料の特性に基づいた電磁界シミュレーションや解析理論を使って行われている。しかし、材料パラメータは一般的に周波数特性を持つので、例えば1 GHzの材料パラメータでミリ波の設計をするとずれが必ず生じてしまう。それに対して従来のように試行錯誤しながら試作・再設計を繰り返し行う代わりに、動作周波数における正確な材料パラメータ値に基づく信頼性の高い設計を行うことができれば、設計・開発期間の短縮化を進めることが可能となる。そのためにも、動作周波数における材料パラメータの値を正確に把握して、それを設計に活用する（設計の高確度化の）仕組みが必要になってくる。また、ミリ波帯においては低損失材料の選定も重要であるが、高精度の材料計測は材料やプロセスの選定にも必須である。

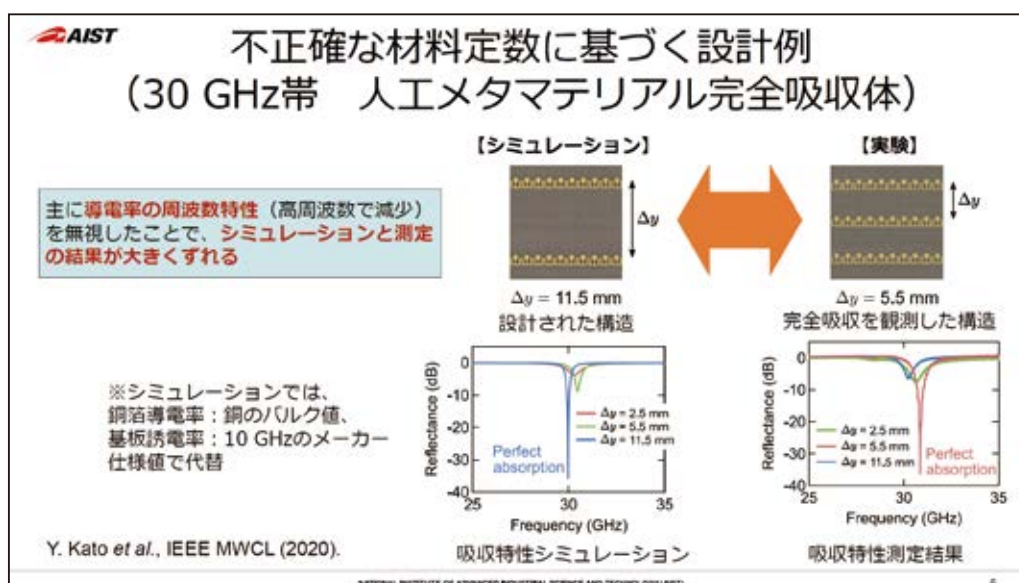


図4-5-3 不正確な材料定数に基づく設計例

不正確な材料定数に基づいたシミュレーションによる設計によって生じる「シミュレーションと試作品との性能のずれ」について、図4-5-3に示す30 GHz帯の人工メタマテリアル完全吸収体を例に説明する。ここでの人工メタマテリアル完全吸収体の動作周波数は30 GHzであり、金属の周期構造を作ることによって吸収性能を持たせている。シミュレーションによる設計段階では、導電率の周波数特性（高周波数で減少）を無視してシミュレーターに入っている銅箔導電率（銅のバルク値）と基板誘電率（10 GHzのメーカー仕様値で代替）を用いたことで、シミュレーションと測定の結果が大きくずれてしまった。つまり、不正確な材料定数に基づいて設計すると、試作品の性能とシミュレーションでの性能が大きくずれてしまうのである。したがって、吸収体のように材料の損失を積極的に活用するデバイスでは、導電率の値も非常に重要なパラメータとなる。

本題として、材料計測の技術課題をどのように克服してきたかを紹介する。高損失の材料評価と低損失の材料評価でとられる方法が大きく異なる。吸収体のようなものに使われる高損失な材料に対しては、アンテナを使ったフリースペース法が一般的に用いられる。一方、回路基板等で使われる低損失の材料、いわゆる基板材料に対しては、フリースペース法では感度が取れないので、共振器を使った方法が一般的に取られる。ただし、従来あった多くの共振器法では材料計測に基底モードが使われており、ある基底モードの周波数を上げるためには共振器や測定サンプルを周波数に反比例して小型化させる必要がある。そのような共振器や測定サンプルの加工精度の限界から、6Gで使われるような100 GHz超での実用的な材料計測技術が確立できていなかった。また、基底モードだけではなく高次のモードの励振を計測に利用するには、計測を阻害する不要な共振モードをいかに抑えるかが重要であり、難しい技術課題であった。

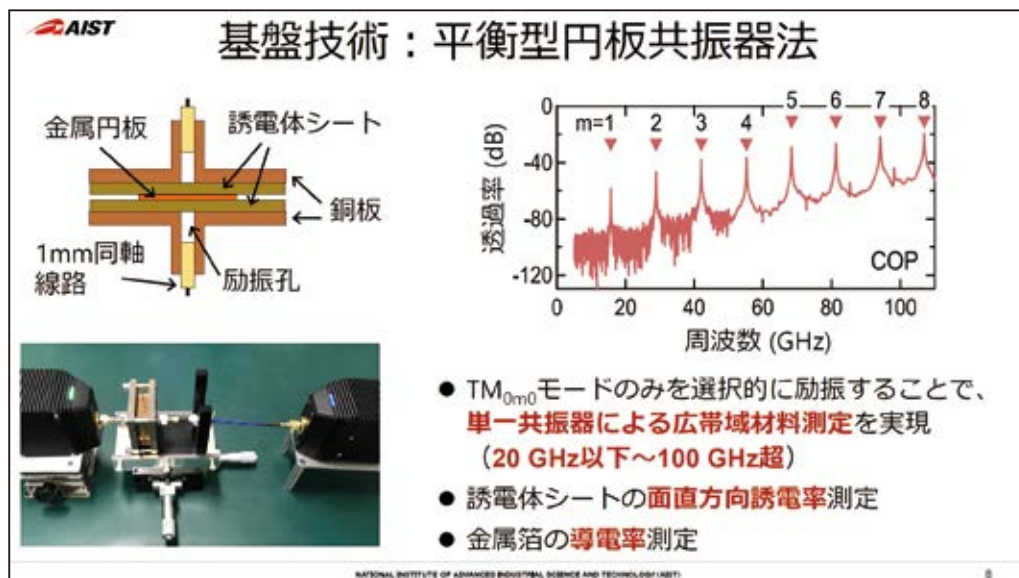


図4-5-4 基盤技術：平衡型円板共振器法

そのような課題を解決する基盤的な技術として、図4-5-4に示す平衡型円板共振器法がある。その共振器の構造は、2枚の誘電体のシートの上に金属箔の円板を挟み、そして上下からさらに銅板で挟んで、その銅板に開いた穴から電磁波の入力と出力を行う誘電体共振器を入れた構造になっている。この共振器では、励振機構も含めた構造の対称性から、共振器中央に非ゼロの電界を持つTM_{0m0}モード（ $m = 1, 2, 3, \dots$ ）のみが選択的に励振されるので、20 GHz以下の周波数から100 GHz超の高い周波数まで等間隔のピークが続いていく特徴をもつ。したがって、不要モードの影響を抑制して全ての高次モードを材料計測に利用できることで、単一共振器を使った1つのシステムで超広帯域の材料測定が実現できる。これを誘電体シートに適用すると面直方向の誘電率測定が、金属箔に適用すると導電率測定が、同じシステムで提供可能である。

これまでの研究開発の成果をいくつか紹介する。まず、図4-5-5に示す6G向けの誘電率計測の研究開発である。この構造の共振器でどこまで高い周波数まで計測できるかは、実は励振機構が決めている。従来はこの部分には1mmの同軸線路が使われており、120 GHz程度が周波数の限界であったが、より細い0.8 mmの同軸線路励振を使うことで、6Gで求められるようなDバンド（110～170 GHz）の誘電率測定を実現した。

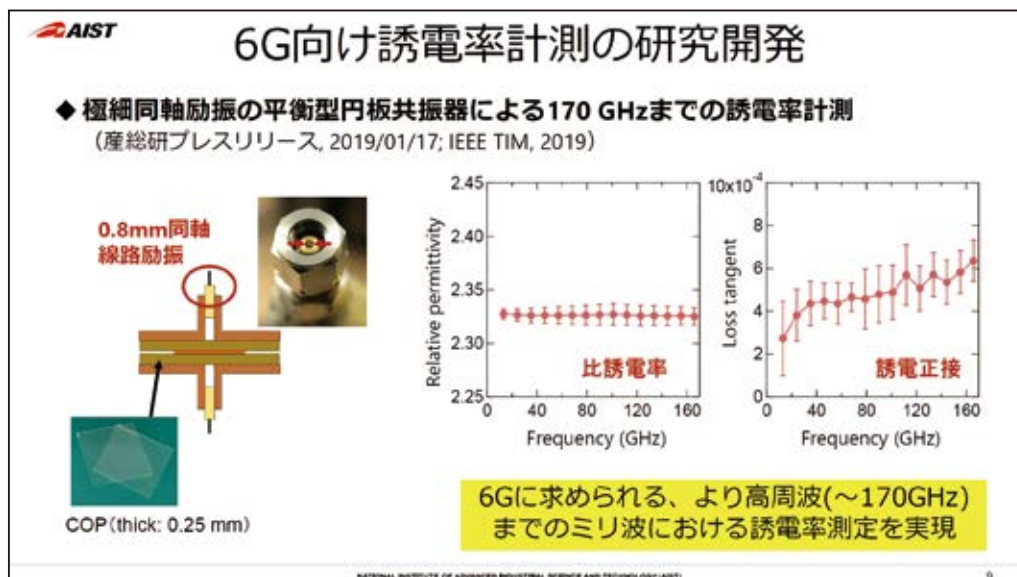


図4-5-5 6G向け誘電率計測の研究開発

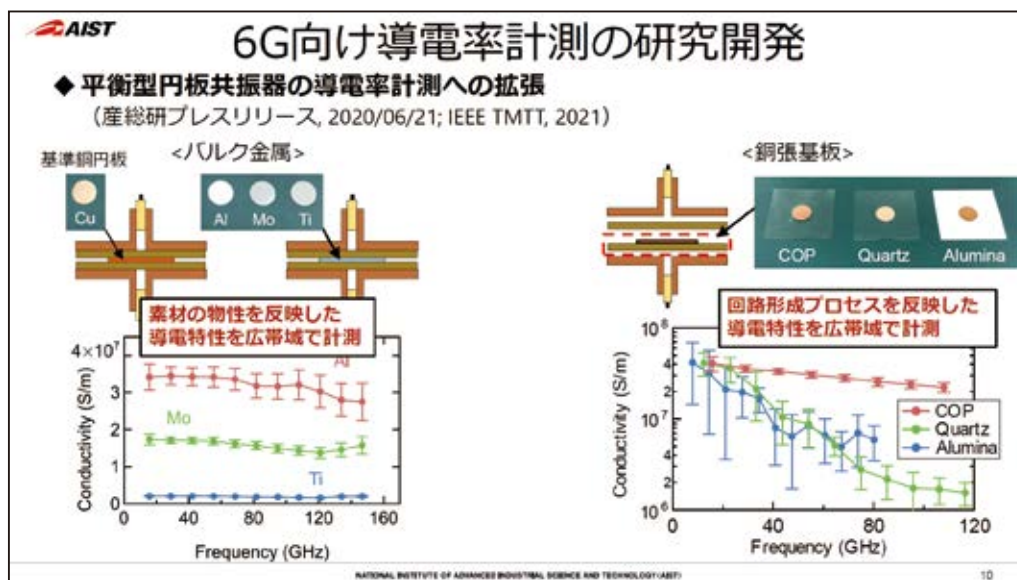


図4-5-6 6G向け導電率計測の研究開発

もう一つは、図4-5-6に示すように導電率計測への拡張を行っている。ミリ波では、誘電率だけではなく導電率も把握する必要があるが、この共振器で2回の測定を行って比較解析することで、誘電率だけではなく導電率の計測にも適用できる。例えば、バルク金属箔の計測の場合は、初めに導電率が分かっている基準銅円板で共振器の測定を行い、この円板を測りたい被測定物に交換して2回目の測定を行う。その結果からQ値を解析することで、バルク金属箔の導電率を100 GHz超まで計測することが可能となる。また、誘電体に

金属が張り付いた基板の界面導電率計測もこの共振器法で可能であり、金属円板の代わりに円形のパターンを使って、回路形成プロセスを反映した導電率の特性の把握ができるようになる。

最後に、技術普及策として国際標準化と製品化の話をする。平衡型円板共振器法による誘電率計測（上限 110 GHz）に関して、IEC での国際標準化を 2020 年 12 月に達成（IEC 63185）した。今後も経産省の支援の下で、平衡型円板共振器法の上限周波数の拡大（IEC 63185 の改訂提案）や平衡型円板共振器法による導電率計測（新規提案）に関する標準化も進めていく予定である。Beyond 5G/6G の材料計測の業界スタンダードとなるためには、（公的な機関での話し合いの結果としての）デジュール標準化は重要な取組になると考えている。製品化に関しては、産総研からの技術移転によって、計測機器メーカー・キーサイト社より平衡型円板共振器法による材料計測システムが製品化されている。

また、産総研では 6G に向けた材料開発も全社的に進めているところであり、10 年後の 6G を見据えた素材・製造技術の高度化による産業価値の創造を目指して、「6G 実現に向けたセラミックデバイスのスペックロードマップ」を策定し、2020 年 12 月 7 日にニュースリリースを行った。

まとめとして産総研での材料計測技術に関する今後の研究開発の方向性を紹介する。今後の方向性の 1 つは、さらなる高周波化を目指して、300 GHz までの誘電率・導電率計測の研究開発を NEDO ポスト 5G 先端研究「6G 向けミリ波・テラヘルツ帯基地局の高度化のためのアンテナ技術の研究開発」にて実施中である。もう一つは、計測対象の拡大として、本日のワークショップのテーマでもある「光と電波の融合に必要不可欠な変換器」に使われるような半導体材料・非線形光学材料・磁気光学材料等の計測において、高い周波数での計測が必要になってくるので、具体的な材料パラメータのテンソル計測（異方性、非対角項）・非線形材料計測・透磁率計測の必要性を認識しており、今後検討していく予定である。

【質疑応答】

Q：今回の話はバルキーな素材の材料パラメータの計測だと思うが、この技術を半導体に拡大していくときには、この計測方法と同じなのか、それとも違うものになるのか。

A：紹介した方法は、いわゆるバルキーなシート状の基板材料に対しての計測技術である。ミクロなオーダーでの計測としては、マイクロ波顕微鏡が代表的である。AFM のような形状で材料表面に局所的に電磁波を当てて表面状態を観察し、そこから誘電率まで求めていく方法である。産総研でも取り組んでいるところであるが、今回の説明からは割愛した。

Q：この計測結果はデータベースとして公開されているのか。もし公開しているのであれば、どのくらいの種類の材料を測っているのか。また、これからどのようなものにまで手を伸ばしてデータベース化していくのか。

A：産総研としてデータベースの提供は行っていない。もちろん、このようなミリ波の特性は世の中にもあまり知られていないので、このような計測技術を基盤としてデータベース化までを行う必要はあると思うが、単独では難しく、まだ行われていないのが現状である。

C：最近、様々なメーカーから、「ファントム（人体と類似電気特性を持った模擬生体）を考えるための材料特性を知りたい。そのようなデータベースはあるか。」という問い合わせがある。精度があまり保たれていないデータベースはあるが、今回紹介されたように、データの精度が違えば試作品の性能とシミュレーションでの性能が大きくずれてしまうので、やはり高精度なデータベースが必要であると思う。今後の産総研の高精度なデータベース化に期待したい。

Q：大学関係者等から「このような測定装置は大変高価なので、なかなかこの領域に手が出せない」という話を聞くが、共用設備の形で提供されるようなことはないのか。

A：周波数が上がれば上がるほど装置の価格も上がっていくので、1 大学や 1 企業で投資できる金額では

ない。共用設備として表立って産総研で行っているものは特にないが、様々な企業からの引き合いはある。まずは受託計測として、それぞれの企業が開発した材料を評価するサービスを数多く行っている。企業側としては、開発した材料に見込みがあると判断すれば、本格的に自社内に評価設備を投資する流れになると思う。我々は設備投資の可否についての判断材料を受託測定サービスとして提供しているところである。

- C : できれば文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ事業 (ARIM) 等の形で皆が共用できるような仕組みができるとよいと思う。
- Q : そのような意味では、産総研は非常に技術が進んでいると思うが、大学レベルで突出してやっているところはあるか。
- A : 国内の大学では、宇都宮大学も先端的な取組をしている。また、日本の中小企業でも、先ほど具体的に名前が出てきた (株) 関東電子応用開発が2020年4月1日に社名をEMラボに変更して、非常に高いレベルの材料計測技術を販売している。
- Q : マイクロストリップ線路の面荒らしのことにに関して、我々の大学にも企業がよく技術相談に来る。彼らは、表面から見て上側がピカピカであればよいと間違った認識をしているようである。電気力線は下側に集中しているので、下側の面荒らしが駄目なことを認識していない。基本的な講習会のようなことが最近あまり行われていないのではないかという気がしており、単に計測技術を貸すだけではなく、講習会のような取り組みが必要ではないか。
- A : 今後、そういうところにも取り組みたいと思う。
- C : 損失や表面荒さは、貼り付けているほうが問題になってくる。表面荒さがないような形で誘電体と金属線路とを接合する技術を適用することは、テラヘルツになると非常に厳しくなるので、大事な領域であると思う。

5 | 総合討論

ファシリテーター：岩本 敏（JST-CRDS）

総合討論では、招聘者（話題提供者、コメンテーター）に事前に依頼したアンケートの回答をまとめた結果を簡単に説明した後、コメンテーターの意見・感想を含めて、システムの視点から取り組むべき研究開発課題、研究開発の推進方法・体制、コミュニティ形成と人材育成に関して意見交換を行った。以下、事前アンケートでの5つの質問に沿って、事前アンケート結果と総合討論での主要な指摘・コメントを示す。

①次世代通信技術（Beyond5G/6G以降）には無線通信と光通信の利用形態の融合が期待される。

これを促進するためにシステムの視点で重要になる要素技術の研究課題（短期、中長期）

招聘者への事前アンケートまとめ

①次世代通信技術（Beyond5G/6G以降）には無線通信と光通信の利用形態の融合が期待される。これを促進するために**システムの視点**で重要になる要素技術の研究課題（短期、中長期）を記入下さい。

- ・アナログやデジタルのビームフォーミング技術。電子的にビームを高精度に制御するフェーズドアレイ。フロントホール用無線多重技術・アンテナ技術、アンテナビーム制御・伝搬制御技術
- ・4096 QAM/OFDMを実現する線形化符号化技術。AIを用いて無線や光の歪を補償する技術
- ・分散MIMOやRoF。
- ・400Gイーサネットとのシームレス化
- ・基地局のフェムトセル化が必須（RoF張出局などが重要）
- ・テラヘルツをはじめとする高周波通信
- ・トランシーバーも波長スケーラブルで小型・低消費電力
- ・障害物を迂回して基地局と端末を高効率に中継するメタマテリアル反射板
- ・材料計測技術の高周波化や高精度化
- ・低損失の基板材料や実装プロセスの開発
- ・NWリソース（アンテナ、周波数バンド、ビーム、メモリ、コンピューティングパワー、電源、データベース、等）の共有・共用・供用化技術（短期）
- ・サイバーセキュリティ（短期）
- ・ヘテロジニアスNW間の接続技術（短期）
- ・超小型原子時計（精度10-12~10-15）によるNW同期の高度化（中長期）。NW同期の高度化に基づく電波利用の高度化（中長期）。超小型原子時計による広域時刻同期
- ・高出力・高効率な高周波電力増幅技術
- ・光電波、電波光変換の高効率化、低電力化とサブシステムのモジュール化
- ・超低遅延・低ジッタ通信技術

図5-1 システムの視点で重要になる要素技術の研究開発課題

（無線・電波と光の相互変換技術）

- ・光と電波の相互変換の高効率化・低消費電力化の課題がある。光から電気、電気から光への変換のところが二乗検波（振幅変調された信号をダイオードの非線形性を用いて復調するもの）になっており、パワーを電流に変えていることから、高効率・高SN比と低消費電力化の両立は困難である。フォトンからエレクトロンに変換できる何か違う技術、違う原理のデバイスの研究開発が重要である。

（異種材料・機能の集積化技術）

- ・ビームフォーミングを含めたアンテナ技術、高効率光電変換等の技術、材料・機能の集積化の技術などがこれからの次世代通信技術の基盤として取り組む必要がある。

- ・異種接合という技術は、光デバイスだけでなく、材料も誘電体、金属など何にでも適用できるので、どのような利用があるのかも含めて検討する必要がある。

(時刻同期技術)

- ・原子時計などを用いて時刻同期の必要性が指摘されているが、このような量子技術も含まれると、無線・光融合基盤技術の領域は裾野が広がる。
- ・無線を使ったセンシングでは同時刻性が重要になる。ネットワークの各機器が持っている時刻がそろっていないと、センシングは難しくなってくる。逆に、時刻がそろっていると、Wi-Fiの電波などを使っても人の動きをきちんと見ることができ、Wi-Fiのほうではそのような標準化も進められている。
- ・モーションセンサをつけなくてもモーションまで含めて検知できるように正確性を上げていくには、正確なタイムベースを持つことが重要になる。例えばイオントラップを利用した原子時計であれば、それが量子ビット (Q bit) につながるので、7G / 8G で量子ネットワークが出てくるのであれば、大変役に立つことになる。
- ・分野が異なるが、半導体LSIの回路で同期信号の安定性は消費電力に効いてくるので、同期の問題は極めて重要である。

②我が国が注力すべき無線・光融合基盤技術 (特にデバイスや材料の技術) の研究課題 (短期、中長期)

②我が国が注力すべき無線・光融合基盤技術 (特にデバイスや材料の技術) の研究課題 (短期、中長期) として、重要と考えられるものを記入下さい。

- ・低消費電力超高速高精度A/D、D/A変換技術。最先端のアナログ技術 (RoF、ビームフォーミング)
- ・アウトフェーシング増幅器など負荷変調型の電力増幅器。テラヘルツ高出力電力増幅器。
- ・基板材料の誘電損失・導体損失の低減技術 (超伝導体を含めた検討)。低損失材料や、積層のための低損失TSV技術。低損失・高機能な材料技術を生かしたデバイス開発。高平滑に金属と誘電体を接合する表面処理技術。
- ・高精度テラヘルツ材料計測技術
- ・導波管集積回路技術
- ・非相関アレイアンテナシステム。OAMアレイアンテナ。
- ・CMOSプラットフォームをベースとしたシステム。CMOSプラットフォームと互換性のある材料やデバイスの開発
- ・高周波デバイスプロセスと回路設計技術 (電磁界回路設計技術)。集積技術 (プラットフォーム技術) ならびに実装技術
- ・メタサーフェス、メタマテリアルなどの新奇デバイス。動的/アダプティブな電波伝搬制御メタサーフェス、メタレンズ、クローカ技術。
- ・メタルフリーの誘電体のみで構成する設計
- ・プラズモニックIC (中長期)。
- ・ナノ真空デバイス (n極管 (→広帯域高出力アンプ))
- ・イオントラップ (→原子時計やQbit等) (中長期)
- ・深紫外半導体レーザーベースのオンチップ光周波数コム発生器 (位相雑音の大幅な低減に寄与) (中長期)
- ・無線通信の技術 (MIMO、変復調、FEC、フレーミング、センシングなど) の光通信への応用
- ・半導体デバイスのサーマルmanagement
- ・無線通信・光通信を経由して電力供給を可能とする新規デバイス。遠隔で物理的にエネルギーを遮断する技術

図5-2 我が国が注力すべき無線・光融合基盤技術の研究開発課題

(高周波デバイス・回路)

- ・高出力・高効率な高周波電力増幅技術は、明らかに化合物半導体に分があるので、化合物半導体の高周波化を図ることが重要である。ただし、量産性・再現性・コストが最大の課題になるので、このような課題を解決していく必要がある。

(低損失の材料、評価技術)

- ・周波数が上がっていくと、使える材料と使えない材料が大きく分かれていくので、その選定が非常に重要になる。それぞれの企業で有望そうな材料を開発しているが、その特性を100GHz超まで把握した上で開発を進めていく必要がある。
- ・テラヘルツ領域での導波路としては、損失を減らすために金属ではなくて誘電体に移る選択肢もある。低損失で高屈折率な材料があれば、誘電体だけで導波路をつくることができるため、新たな高屈折材料創出の研究開発は重要である。

③前述の①・②の研究開発の効率的な推進に向けて、無線技術、光技術、材料技術などの異分野の研究者を連携させる仕組み・研究体制

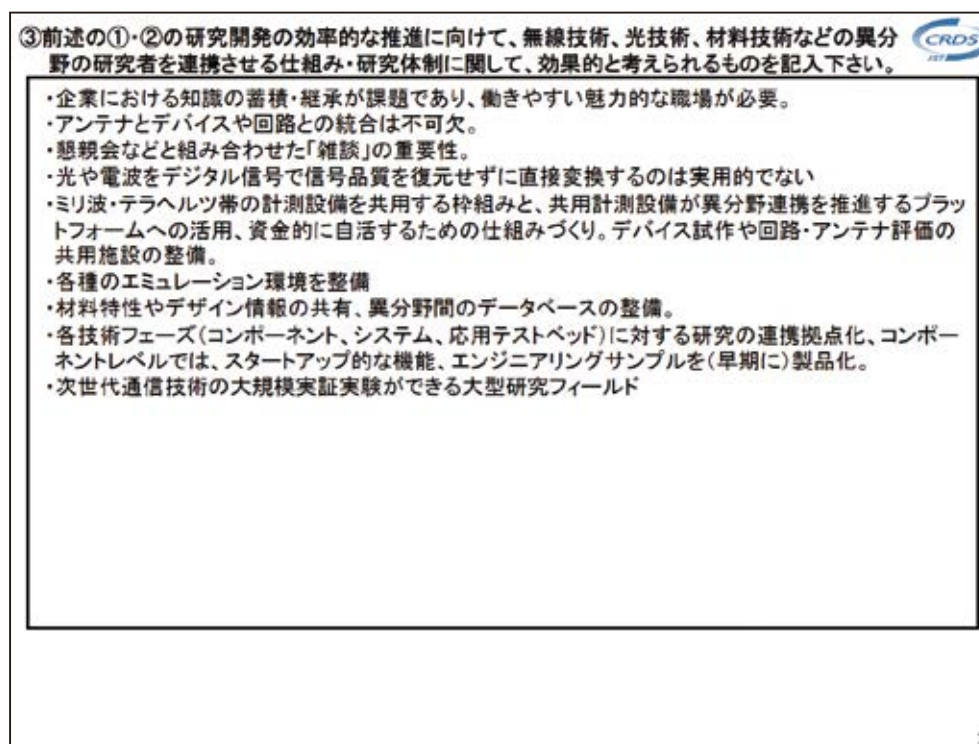


図5-3 異分野の研究者を連携させる仕組み・研究体制

(システムに繋がる仕組み)

- ・テラヘルツ領域の要素技術は様々出てきているが、通信応用に向けた有機的な連携ができていないことが問題であり、これらを連携させていくことが重要である。
- ・日本は光技術と無線技術ではまだ世界に負けないものを持っているが、これらがばらばらになってつながっていない。これらをつなぐことがとても大事である。
- ・テラヘルツ波やミリ波がシステムの中でどのように使われていくのかを理解し、チップを作っていくことが重要である。システムのエミュレーションをやり、その中で技術の問題を洗い出すことが必要である。システムにどうつながるかという観点で下位のレイヤー（ハードウェア）の物理上の特性を決めていく議論が必要である。
- ・システムなど上位レイヤーの視点から性能要求を出していくことにより、別の分野で基礎研究をしている研究者がその要求を聞くことでそこに注目し、新しいデバイスの原理や構造の研究が進むことが期待される。

- ・システム化するためには、システムを考える人たちが部品を使えるレベルになっていないといけない。以前に行われたJSTの産学共創基礎基盤研究プログラムのように、研究開発・試作中の先進的な素子や装置・システムを他の研究・開発グループ等に実際に使用してもらい、供試結果を研究者・開発者にフィードバックするような仕組みが必要である。ショーケースのようなものを国がサポートする形で、産業界の力を入れていくことも重要である。
- ・日本にはよい部品や技術はあるが使えるところまでいかないのが、利用側が活用できる様々な素子・デバイスが提供されるプラットフォームを作り、コーディネータ的役割をもつ者（グループ）を配置し、カスタマーと開発側をつなぐような形を模索していく必要がある。
- ・研究開発プロジェクトが終わったときにチップセットのようなものを何セットか作り、手を挙げた人が自由に使えるような仕組みがあると、その技術を開発しただけで終わらずに技術がつながっていく。
- ・プロジェクトの成果をチップセットのような形で配れるようになるとうい。電子情報通信学会で、マイクロ波通信のチップを配ってコンペをやらせている例もあり、配れるチップを作るとともに、イベント化して様々な人が入ってきて関係者が広がっていく仕掛けが必要である。
- ・応用研究のプロジェクトの予算の10%程度を先端研究として大学へ研究委託し、それが次のプロジェクトに繋がるようなよい循環が生まれる仕組みが必要である。

（研究体制）

- ・基本的には大学でも人材が限られているので、全部に手が出せるわけではない。その意味では、使えるプロセスがあったとしてもすぐには使えない。そのため、共同研究的に同じ方向に向かって走ってくれて装置・プロセスも持っているパートナーが、一緒になってつくっていくような体制が必要である。
- ・日本の特徴として、化合物半導体のトランジスタ（HEMTなど）の研究からアンプの研究をやったり、シリコンのMOSFETからアンプをやったりする人が多い。また1つの企業や大学にノウハウがそのまま固定してしまっており、その人が辞めたらそこで終わってしまう問題がある。一方、ヨーロッパは材料系に関係なく高周波の電力増幅技術の専門家がいる。またアメリカでは、論文も書いて技術に詳しいコンサルタントのように個人がいて、各企業を回って高周波の設計に関与したりしている。海外のように、技術をうまく分担するやり方が必要である。

（共用施設）

- ・NICTや産総研にリソースを投入して共用施設としてオープンにしていくことは必要である。一方、どこかに使いに行くのはハードルが高いため、各大学に入っている装置のレベルの底上げをしていくことも必要であり、これらのバランスが重要である。
- ・100GHz超までの応答を評価できる環境や共用設備を日本全体で整えて、低損失の材料開発に注力できるようにすることが必要である。
- ・実際にテラヘルツ用のデバイス・回路を動かしたときに、どう動いているかを計測する計測環境も必要である。これらはトップを走っている技術集団にしか揃えられないが、日本はまだそのトップにいたので、エミュレーション環境・計測環境をいち早く揃えて皆が使えるようにしていくことが必要である。
- ・計測設備が共用で使えるような拠点は、立ち上げのときはよいが、その後の長期にわたる維持が問題になるので、例えば設備の更新やテクニシャン・オペレーターの費用なども含めて維持していくための仕組み（企業からの投資、資金的に自活した運用など）をうまくつくっていく必要がある。
- ・拠点管理の方法として、企業の60歳を超えたシニアに来てもらい、装置の管理とともに学生と一緒に研究をやってもらおうと、設備管理だけでなく学生の教育、シニアの意欲促進につながる。また、その人たちがいなくなる前に、その技術の継承をきちんとすることも重要である。
- ・予算的側面では、装置の更新は基本的には補正予算狙いであり、10年に1回当たるといった宝くじのような形になっており、これが大きな問題である。
- ・最先端の通信デバイスを試してみたい側からすると、通信実験用のフィールドとトータルコーディネートし

てくれる人が用意されて、自分の機器を持ち込んでつなぐだけでテストできるようになると開発が進む。

④アカデミアと産業界との連携の仕組み、コミュニティ形成、国際標準化活動、海外連携

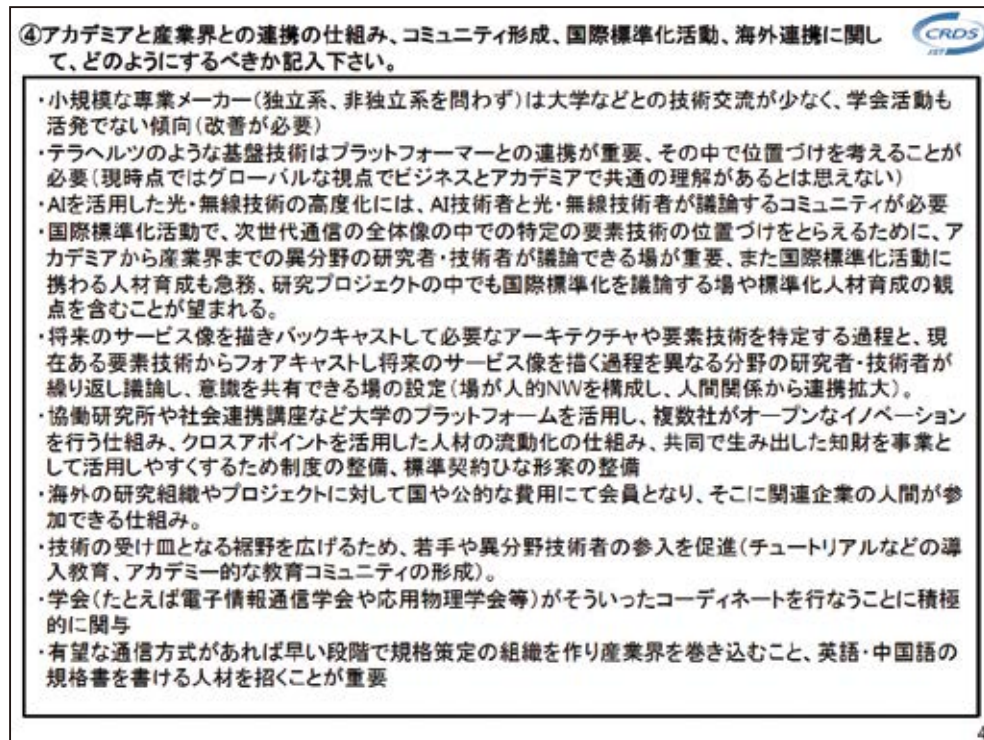


図5-4 アカデミアと産業界との連携、コミュニティ形成、国際標準化活動、海外連携のやり方

(アカデミアと産業界との連携の仕組み)

- ・企業が直面している今の問題点や様々なシステムを共有すれば現状の課題が可視化される。日本はその製品を作っておらずユーザーの立場なので課題が可視化されていない問題はあるが、なるべく生の情報を開示して判断しやすくして議論することが重要である。
- ・企業も昔と違って体力がないので、ある程度完成された技術でないと受けてくれないが、大学で信頼性試験など技術の完成度を高めることは難しい。そのギャップを埋めるためには、国などの公的資金を使って両者をつなげる必要がある。

(コミュニティ形成、学会活動)

- ・若い人にとって電子情報通信学会は魅力に映っておらず問題になっている。
- ・その業界が元気でなければ学会も活性化しないだろう。光や無線の技術は世界でも負けていないので、シニアの人たちが頑張ることで業界全体を活性化していけば、若い人にとっても学会および業界も魅力的になると思う。
- ・学会活動ということに関しては、様々な光デバイス、電子デバイスが作られてきた黎明期を知っている先生や研究者・技術者が今はリタイアしていきおり、そこに危機感を持っている。そのような人と学生がコミュニケーションできるような場を用意しなければいけない。
- ・学会での企業からの発表が少なくなってニーズの吸い上げがうまくできず、大学の研究と企業のニーズが少し乖離してきたように感じており、大学に企業のニーズがうまく反映させる方法を検討する必要がある。
- ・このワークショップのような活動を学会がやってもよい。狭い国だからこそ応用物理学会や電子情報通信

学会が学会連携をしながらこのようなコーディネートをすることで、新たな学会の価値をつくっていきけるのではない。

(国際連携)

- ・フィンランドのオウル大学はフィンランド1国ではなく欧州の中に広げて活動を展開しており、日本も国際化の視点で例えばアジアで協力していく仕組みを考えていく必要がある。
- ・国内のみならず一緒に開発する海外とも次世代通信技術の筋道やシナリオを共有していくことが重要であり、様々な場所で様々な人たちと様々な事柄を話し合うことが必要である。

⑤ CRDSの仮説、人材育成などに関する意見

⑤次ページのCRDSの仮説、人材育成などに関するご意見がありましたら記入下さい。

(仮説について)

- ・シーズから発想するのであれば、光技術、無線技術それぞれの課題を示し、その課題が、光無線融合技術で解決する可能性があることを示さないと具体的な目標ターゲットが明示されない。ニーズからの発想であれば、コンピュータ応用しる通信網にしる、現状の課題が何でそれらが現状技術の延長では解決できそうもなく、光無線融合であれば解決できそうだと、というくらいの見通しは必要。
- ・検討中の仮説では、次にどのような可能性があるのかという点では議論が不十分。
- ・基礎科学を確立するための技術開発という観点からは、この仮説は間違っていないように思えるが、実用化に関しては、ビジネスとの関係が不明確
- ・産業競争力強化の視点では、高出力化により無線・光電力伝送などへの展開の可能性もある。
- ・前技術に対するマーケットドリブンな技術開発も行われており、前技術との互換性も競争力を生む可能性がある

(特許・知財)

- ・産学官連携での特許活用における日本版パイドール法の問題(「特許を売却する場合に、買取側は公共の福祉に反しない限り権利を行使できる」という一文があり、企業は決断できない場合がある)。
- ・標準化には産学間の権利の調整が必要。

(人材育成)

- ・人材育成と幅広いアイデアを拾い上げる方策として、キャリアの浅い時期から独立して研究を実行できる環境(資金や設備)を大学や公的研究機関では整備すべき。
- ・選択と集中は、過去20年程度に渡って実施されてきたが、良い結果をもたらしていない
- ・パーティカルに全体のシステムを設計・最適化、システム全体を眺められる人材の育成(クロスポイントなどを活用した人材の流動化など)、そのような人材を雇用して育成できる中長期のファンディング
- ・ニーズブル(ポテンシャルマーケットドリブン)型の研究開発ができる人材と研究テーマを育成すべき

図 5-5 CRDSの仮説と人材育成についての意見

(CRDSの仮説：シナリオ・目標の明確化)

- ・ある程度大きなビジョンを1つ描いた上で、そのビジョンに向かっていく研究が必要であり、アカデミアと企業を集めるシナリオ、ストーリーが重要である。そのようなプロジェクトフォーメーションができれば、技術のベースはあるので、1つにまとまっていく。
- ・Beyond 5G/6Gの数値目標に関しては、様々な白書に同様なものが書かれており、ある程度は決まっているが、標準化団体の中ではまだ議論されていない。
- ・現時点において次世代通信技術の筋道やシナリオの明確化という点ではまだできておらず、そこを幅広い人たちの間で共有できることが重要である。
- ・テラヘルツ波の前にミリ波で頑張ることも大事である。ミリ波はモビリティ応用では使いづらく、デバイス技術と併せてそれをアプリケーションから見て使いこなす技術など多層的に見なければいけない。このため、多くの人が集まる場を設定し、全体的に上から下まで見て価値をつくっていくことが重要である。
- ・革新技術の軸と目標の軸は直交するようなところもあるが両方とも重要であり、広く見ていく必要がある。

- ・日本が計測分野で頑張ってきたテラヘルツ技術は初めて通信という旗（フラッグ）を見つけ、以前の計測分野の要求とはかなり違ってきている。材料からシステムまで様々なレイヤーの技術が必要であり、これらをどうつないでいくかが重要である。

（特許・知財）

- ・大学を含めて公的な研究機関で出された成果を企業に移管して事業化していくときには、知財の問題を明確にしておく必要がある。
- ・企業と共同研究して特許を共同出願した場合、経費は半分を大学が負担するが、相手方企業が実用化・製品化したときには両方とも出願人のため使用料は取れないといった問題も生じるため、注意しておく必要がある。

（人材育成）

- ・次世代通信の研究開発にはダイバーシティが必要であり、多様な人材を巻き込んで取り組んでいかなければならない。
- ・日本の研究室では学部の学生やマスターが主力だったりするが、例えばスタンフォードのラボでは全員がPhDであり、日本でもPhDの学生を増やすためにはどうすればよいか、ファンディングやサポートも含めて考える必要がある。
- ・次世代通信の技術開発において誰かが音頭をとること（オーケストレーション）は重要であり、日本はそのような人が欠けているので、どこからか探すか育成が必要である。
- ・DARPAのプロジェクトマネジャーは国際会議に出て常に新しい技術や新しい提案を見ており、誰と誰を結びつけるとよいかなど考えている。オーケストレーターになる人はこのような活動を通して通信システムや技術をよく知っている必要がある。

（他の応用領域への展開）

- ・電波は空中を飛んでいるので、情報を伝えるだけではなく、そこから空間の情報を得ることも可能であり、サイバーフィジカルシステムの中での実世界を知るセンシングへの利用が期待される。
- ・テラヘルツの特長として絶対バンド幅の増大とアンテナの小型化があり、エネルギーハーベスティングでエネルギーをキャパシターに蓄えておき、ウェイクアップレシーバで瞬時に電源オンにして高ビットレートで計測データを送り、その後瞬時に電源オフになるといった小型・超低消費電力のIoTセンサへの利用が考えられる。
- ・IoT機器への電力供給（無線給電）への利用が考えられる。腕時計型のデバイス等を装着して健康状態をモニタリングすることが行われているが、今はスマホと腕時計型デバイスに毎日充電しなければならず、データが取得できない期間が存在する。無線給電で終日充電できるようになると、大きなメリットとなる。

【総合討論のまとめ】

総合討論における様々な有益な情報や指摘・コメントがあり、以下に要点をまとめておく。無線・光融合基盤技術に関する戦略提言に向けて、これまでにCRDSが検討してきた具体的な研究開発課題、研究開発の推進方法などに関して、この総合討論の議論を反映する形で今後検討していく。

（1）システムの視点で重要になる要素技術の研究課題

- ・新原理に基づく高効率・低消費電力の光電変換デバイス
- ・ビームフォーミングを含めたアンテナ技術、高効率光電変換等の技術、異種材料接合技術、材料・機能の集積化技術
- ・ネットワーク機器の正確な時刻合わせのための原子時計などによる高精度時刻同期技術

（2）デバイスや材料の研究課題

- ・量産性・再現性・コストも含めて高出力・高効率な高周波用化合物半導体デバイス

- ・テラヘルツ帯の材料特性評価技術、低損失の導電体材料・誘電体材料、誘電体導波路

(3) 異分野の研究者を連携させる仕組み・研究体制

- ・テラヘルツ領域の個々の要素技術をシステムでの利用に向けて繋いでいく仕組み
- ・研究開発した先進的な素子や装置をコンペやイベントで他の研究・開発グループ等実際に使用してもらい、関係者を広げていく仕組み
- ・国の研究機関をベースとした高周波計測装置、デバイス試作装置・設備の共用化と長期的に維持していくための仕組み作り、および各大学における個々の装置のレベルの底上げ

(4) アカデミアと産業界との連携、コミュニティ形成、国際標準化活動、海外連携

- ・学会などでの企業が直面している通信システムの様々な問題点・ニーズの産学での共有と、これらの課題への連携した取り組み
- ・国などの公的資金を使ったアカデミアと産業界の接続
- ・次世代通信技術のシナリオの国内外のステークホルダーとの共有

(5) CRDSの仮説、人材育成などに関する意見

- ・大きなビジョンを描いた上で、アカデミアと企業を集めるシナリオ・ストーリー、およびそのビジョンを実現する研究開発の実施が重要
- ・次世代通信の研究開発には音頭をとる人（オーケストレーター）とともにダイバーシティが重要であり、多様な人材を巻き込んだ取り組みが必要

付録

付録1 開催趣旨・プログラム

開催趣旨

JST研究開発戦略センター（CRDS）では、科学技術に求められる社会的・経済的ニーズを踏まえて国として重点的に推進すべき研究領域や課題を俯瞰の視点から系統的に抽出し、そのファンディング戦略を明確にするための活動を行っております。このような活動の一環として、これまでに技術分野の俯瞰を目的とした「俯瞰ワークショップ」や、重要テーマの研究開発戦略を検討する「科学技術未来戦略ワークショップ」などを開催して参りました。

本ワークショップ「次世代通信技術の高度化に向けた無線・光融合基盤技術」は、上記「科学技術未来戦略ワークショップ」に位置付けられます。近年、高度なデジタル社会の実現に向け、フィジカル空間とサイバー空間をつなぐ高速・大容量・低遅延・多接続・低消費電力・セキュアな次世代の通信技術が期待されています。これまでの通話やメール、SNS、写真・動画送信、テレビ電話などといった個人の利用だけでなく、工場、農業、サービスなどの産業での利用、災害時での接続確保など社会インフラ・基盤としての役割も重要になってきています。特に、IoTを活用した様々なサービスの提供が期待される分散コンピューティングやモバイルエッジコンピューティング（MEC）では、応用やサービスに適した様々な形態のネットワークの構築が重要になると考えられます。クラウドとエッジの携帯端末とをつなぐ移動無線通信は近年の5Gに代表されるように高速・大容量化が進み光通信との差が小さくなってきており、無線通信技術と光通信技術のそれぞれの特長・利点を活かしたネットワーク構築に向けた技術開発やシステム設計が必要になると考えられます。このため、基地局のオープン化の流れと共に様々な技術レイヤー、ステークホルダーを巻き込んでBeyond 5G/6Gに向けた研究開発が世界的に活発になってきています。一方、これまで無線通信の高速・大容量化は数百MHz～数GHzの周波数を用いて、主に通信方式の高度化や多重化により行われてきましたが、今後はさらなる周波数利用効率の向上に向けた技術の創出とともに、ミリ波・テラヘルツ波（THz波）といった未踏の周波数領域を利用する技術開発が不可欠になると考えられます。ミリ波・THz波はこれまでの無線（マイクロ波）と光の間の周波数領域であり、高効率・低消費電力の発振・増幅・検出デバイス・回路、空気による減衰の影響を低減する指向性アンテナなど様々な技術的課題はありますが、これまでの無線と光、エレクトロニクスとフォトリソグラフィの知見や技術をうまく活用して新たな技術（無線・光融合基盤技術）を創出することも期待されます。本ワークショップは、無線・光融合基盤技術に関わる科学技術の強化に有効な研究開発戦略策定の一環として開催するものです。

CRDSでは、有識者へのインタビューやセミナー開催、国内研究会・国際学会への参加などの調査活動を通して、今後取り組むべき重要な研究開発課題や、それを実施する研究開発の体制・仕組みなどについて検討し、無線・光融合基盤技術に関する仮説（骨子案）を作成しました。本ワークショップでは、このCRDSの仮説を提示し、将来の社会像・応用からの次世代通信技術に対する要求と期待、技術展望とコンソーシアムの取組、挑戦的な無線・光融合基盤技術の研究開発について話題提供してもらいます。これらを基に、我が国が取り組むべき研究領域や、効果的な研究体制、異分野連携・産学連携、人材育成などについて総合討論で議論します。これらの議論を通して、無線・光融合基盤技術の研究開発の方向性を明らかにし、取り組むべき科学技術とその推進方法、産学官連携の方策などの共通認識を得たいと考えております。

なお、本ワークショップは非公開とさせていただきますが、議論の内容は報告書として纏め、参加者及び関連府省に配布後、CRDSのwebサイト上で一般公開させていただくと共に、今後の施策や提言書作成の参考にさせていただきます。

プログラム

開催日時：2021年11月13日（土）9：30～17：00

開催会場：TKP市ヶ谷カンファレンスセンター バンケットホール8B

およびオンライン（Zoom）会議

（敬称略）

- | | | |
|-------------|---|-------------------------|
| 9：30～ 9：35 | 開会挨拶 | 曾根 純一（JST-CRDS） |
| 9：35～ 9：55 | ワークショップの開催趣旨と骨子案の説明 | 馬場 寿夫（JST-CRDS） |
| 9：55～11：10 | （話題提供1）無線・光融合が拓く次世代通信技術に対する要求と期待 | |
| 9：55～10：20 | 無線・光融合が拓く次世代通信技術への要求 | 寶迫 巖（NICT） |
| 10：20～10：45 | バーティカルサービス×次世代通信×日本 | 森川 博之（東京大学） |
| 10：45～11：10 | 遠隔医療・手術ロボットからの次世代通信技術に対する期待 | 菅野 貴皓（リバーフィールド） |
| 11：20～12：10 | （話題提供2）次世代通信の技術展望とコンソーシアムの取組 | |
| 11：20～11：45 | 6Gの進化の方向性 | 須山 聡（NTTドコモ） |
| 11：45～12：10 | Beyond5Gに向けた研究開発 | 中尾 彰宏（東京大学） |
| 13：00～15：15 | （話題提供3）次世代通信技術に向けた挑戦的な無線・光融合基盤技術の研究開発 | |
| 13：00～13：25 | THzシステムに向けたデバイス・回路技術 | 永妻 忠夫（大阪大学） |
| 13：25～13：50 | Massive MIMOの限界とブレイクスルー技術 | 本城 和彦（電気通信大学） |
| 13：50～14：15 | THzメタサーフェス技術 | 真田 篤志（大阪大学） |
| 14：25～14：50 | 無線・光融合に向けた異種材料集積光回路技術 | 西山 伸彦（東京工業大学） |
| 14：50～15：15 | 高周波材料特性評価技術 | 加藤 悠人（産業技術総合研究所） |
| 15：25～16：55 | 総合討論 | ファシリテーター：岩本 敏（JST-CRDS） |
| | 1. 我が国が長期的に注力すべき次世代通信基盤技術の研究領域 | |
| | 2. 次世代通信基盤技術の活用が期待できる他の技術領域や魅力的な応用 | |
| | 3. 次世代通信システムの視点も含め基盤技術を強化する研究開発体制 | |
| | 4. 技術や知見の融合による新たな学術領域の形成などを目的に、無線技術、光技術など
異分野横断のコミュニティ形成方法 | |
| | 5. その他（ニーズとシーズの融合や国際標準化活動に向けた産学官連携、海外連携、人材育成など） | |
| 16：55～17：00 | 閉会挨拶 | 曾根 純一（JST-CRDS） |

付録2 参加者一覧

(敬称略)

招聘者

(話題提供者)

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

(コメンテータ)

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

JST-CRDS チームメンバー

- ・ 曾根 純一 ナノテクノロジー・材料ユニット 上席フェロー (チーム活動総括責任者)
- ・ 馬場 寿夫 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー (チームリーダー)
- ・ 岩本 敏 特任フェロー、東京大学生産技術研究所 教授
- ・ 佐藤 勝昭 特任フェロー、東京農工大学 名誉教授
- ・ 林 喜宏 特任フェロー、慶應義塾大学理工学部 訪問教授
- ・ 赤木 浩 フェロー
- ・ 高島 洋典 フェロー
- ・ 的場 正憲 フェロー
- ・ 福井 章人 フェロー
- ・ 竹内 良昭 フェロー
- ・ 池田 健 (戦略研究推進部 主任調査員)
- ・ 勝又 康弘 (戦略研究推進部 主任調査員)
- ・ 新井 正伸 (研究プロジェクト推進部 主任調査員)
- ・ 大窪 宏明 (研究プロジェクト推進部 主任調査員)

JST-CRDS

- ・ 永野 智己 総括ユニットリーダー・JST 研究監
- ・ 眞子 隆志 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・ 荒岡 礼 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・ 沼澤 修平 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー

- ・ 福井 弘行 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・ 渡邊 孝信 ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・ 大山 みづほ ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
- ・ 伊藤 聡 ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー、計算科学振興財団
チーフコーディネーター
- ・ 八巻 徹也 ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー、量子科学技術研究
開発機構 高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部 次長
- ・ 木村 康則 システム・情報科学技術ユニット 上席フェロー

関係府省・機関等

- ・ 恒次 創 総務省国際戦略局技術政策課研究推進室 イノベーション推進官
- ・ 吉元 拓郎 文部科学省研究開発局環境エネルギー課 課長補佐
- ・ 小菅 理 新エネルギー・産業技術総合開発機構 専門調査員
- ・ 橋本 順一 新エネルギー・産業技術総合開発機構 主査
- ・ 中村 大輝 新エネルギー・産業技術総合開発機構材料・ナノテクノロジー部職員
- ・ 新井 志穂 新エネルギー・産業技術総合開発機構 研究員
- ・ 西村 長実 新エネルギー・産業技術総合開発機構 主査
- ・ 青柳 昌宏 産業技術総合研究所TIA推進センター 招聘研究員
- ・ 安田 哲二 産業技術総合研究所 エレクトロニクス・製造領域長
- ・ 並木 周 産業技術総合研究所プラットフォームフォトンクス研究センター
研究センター長
- ・ 内山 邦男 産業技術総合研究所 招聘研究員
- ・ 森 雅彦 産業技術総合研究所エレクトロニクス・製造領域 研究戦略部長

JST

- ・ 舘澤 博子 戦略研究推進部 調査役
- ・ 佐川 みすず 研究プロジェクト推進部 主任調査員
- ・ 小山 健一 研究プロジェクト推進部 主任調査員

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

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

CRDS-FY2021-WR-07

次世代通信技術の高度化に向けた 無線・光融合基盤技術

令和 4 年 2 月 February 2022

ISBN 978-4-88890-773-6

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

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

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

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

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

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

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

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

Any quotations must be appropriately acknowledged.

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

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



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