

特集:東京工業大学 // ブルーオーシャンICT

- 2 変化し続け未来を創る大学
国立大学法人東京工業大学 学長 益一哉
- 4 工学院におけるICT分野の研究と産学官連携
国立大学法人東京工業大学 植松友彦
- 6 オープンイノベーションを活用した産学連携活動
国立大学法人東京工業大学 大嶋洋一
- 10 超スマート社会推進コンソーシアムが推進するオープンイノベーションとオープンエデュケーション
国立大学法人東京工業大学 福田英輔
- 14 大岡山5G/6G実証フィールド
国立大学法人東京工業大学 阪口啓
- 18 世界にない新しい構造の平面アンテナをつくる
国立大学法人東京工業大学 廣川二郎
- 22 次世代無線通信システムを支える最新ミリ波・テラヘルツ波IC技術
国立大学法人東京工業大学 岡田健一
- 26 次世代分散コンピューティング技術に向けた超広帯域光トランシーバ用光集積回路の研究開発
国立大学法人東京工業大学 西山伸彦
- 30 東工大スマートモビリティ研究教育フィールドを活用した自動運転を支える通信技術の研究開発
国立大学法人東京工業大学 Yu Tao 福田英輔 阪口啓
- 34 駿河湾スマートオーシャン計画と通信インフラ
国立大学法人東京工業大学 渡邊文夫 阪口啓

Close-up

- 38 衛星伝搬の壺 <4>
電気通信大学名誉教授 唐沢好男
- 42 SOMETHING NEW
企画プロデューサー 新山賢治

re:marks!

- 46 健全な幼児の発達基盤へ保育の質と量をつなぐICT
九州産業大学 田中沙織 / ゴレタネットワークス株式会社 黒田正博
- 50 B-SATの30年とこれから
株式会社放送衛星システム

デジタルな法律相談ちゃんねる

- 52 広告であると広告されない広告
弁護士 杉本隼与

各界だより

- 54 総務省ほか

【表紙の写真】

最左上:登録有形文化財(建造物)に登録されている1934年竣工の本館。
最右下:最先端の研究施設が集まるすずかけ台キャンパス(横浜市内)。
左下から右上へ:世界トップクラスの性能を誇るスパコン「TSUBAME」。
最先端環境エネルギー技術研究の「環境エネルギーイノベーション棟」。壁面に太陽光発電を活用している。
学生のための国際交流拠点「Hisao & Hiroko Taki Plaza」。
大岡山キャンパス正門傍にある百年記念館。
(掲載協力・画像資料提供:東京工業大学)

変化し続け未来を創る大学

東京工業大学大岡山キャンパス
正門にある百年記念館からの風景
正面は本館、右に図書館（通称チーズケーキ）、
左に 2021 年 4 月に開館した Taki Plaza



国立大学法人東京工業大学
学長 益一哉

--- 東工大の今 ---

本学は、2016年に大学組織の大幅な改組を含む「教育改革」「研究改革」「ガバナンス改革」を断行し、2018年3月「科学技術の新たな可能性を掘り起こし、社会との対話の中で新時代を切り拓く」ことを掲げ、指定国立大学法人に指定された。指定国立大学法人構想の立案の中で、教職員や学生の集うワークショップを何度か開催し、自分たちは何者であり、何を指すという議論を行い、図1に示す「ちがう未来を、見つめていく。」と表現される「東工大ステートメント2030」に纏めた。

筆者は2018年に学長に就任し、より具体的なアクションプランの立案をする中で、未来を創っていかうと意気込む我々は如何なる気持ちをもつことが求められるのだろうかと考えた。それが「多様性と寛容」「協調と挑戦」「決断と実行」からなる「東工大コミット

メント2018」に集約され、具体的に「アクションプラン2018-2023」となった（図1）。筆者自身は、このコミットメント2018を常に念頭に東工大の運営に取り組んで来た。

具体的な研究の取組について紹介しよう。指定国立大学法人構想の中で、教育、研究に特に注力する分野として図2に示す重点分野、戦略分野を掲げた。重点分野は本学において研究者数も多く実績も挙げてきた分野であり、戦略分野はこれからより注力して生きたい分野として位置づけた。さらに社会との対話を通じてでありたい未来を描き、次の種となる本学の（研究としての）底力の強化という循環を明確にした。

大学の研究では、研究者の自由な発想と闊達な議論を通じて、無から有を生むような様々な成果を挙げたいと誰しもが思い描くし、東京工業大学もそのような大学でありたい。一方で、大学の大きな方向付けという意味で、人や施設、資金を重点的に強化する分野も示しておくことも必要である。

例えば2018年度から開始された卓越大学大学院プログラムでは重点3分野から、毎年度計画に申請し採択された。2019年度には本稿の読者にも関連する「デジタル社会デバイス・システム」の分野で「最先端量子科学に基づく超スマート社会エンジニアリング [1]」が採択され、多くの企業に参画していただき博士教育に取り組んでいる。また、革新的半導体集積回路の創生を目的とする「次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業」には、本学が代表機関となり、豊橋技術科学大学、広島大学と連携した「集積 Green-niX 研究・人材育成拠点 [2]」が採択された。

このように重点分野や戦略分野に定めたことで、学



図1 目標実現のための Who - How - What



図2 研究、教育における重点分野と戦略分野

内の部局を超えた研究、教育の議論の活性化を促し、大学としても資源（人、スペース、資金）の投資判断に大いに役に立てている。

図2に示している社会の対話を進めるのが「未来社会デザイン機構 (DLab) [3]」である。DLabは、「人々が望む未来社会とは何か」を、社会の一員として考え、デザインすることを目的として2018年9月に設置し、これからの科学・技術の発展などから予測可能な未来とはちがう「ありたい未来」を若者や企業、公的機関の方々なども含めた多様な人々と共に考える取組を行っている。そのひとつつ成果が24の「未来シナリオ」である(図3)。例えば、このシナリオの実現可能性や見直しを、卓越大学院プログラムに参加する学生による議論や若手研究者の集まりでも行っている。2018年に立ち上げた基礎研究機構では、若手研究者に意識的に時間を確保する機会を設け、自らの学術的興味に基づいて独創的・萌芽的な研究課題を見出し、社会的



図3 未来シナリオ (24のシナリオの一部)

な期待や責任を自覚しつつ研究を推進することの重要性を肌で感じられる場を提供しており、ここでも未来シナリオの議論をしている。このような議論は自然と異分野融合研究の提案に結びつき、大学としてもこのような研究への資金援助を行っている。

--- 東工大のこれから ---

平成の30年、世界のGDPは伸びているにも拘わらず、我が国のGDPは成長していない。一方で、製造業に係わるGDPは世界全体でも伸びていない。ITをはじめとする新しい産業が世界では勃興し、新しい産業が生まれ成長したのである。翻って、東工大の設立理念である「人をつくり、工業工場（産業）を興す」に立ち返ると、結局はこの30年の間、東工大は何も出来なかったのかと自問せざるを得ない。2022年度から始まった国立大学第4期中期目標・中期計画立案の際に「理工学の再定義」と謳った理由である。これまでの東工大が強い分野を発展させるだけではなく、新たな学術分野の開拓や産業の芽を育てることを目的に、東京医科歯科大学との法人統合・大学統合を目指すことを2022年10月に発表した。共に未来を創るという高い視座に立っての取組である。

新たな未来を創造するためにイノベーションが求められる。イノベーションの源泉は、インベンションは勿論のこと多様性にもあると言われている。政府「教育未来創造会議」の2022年5月の第一次提言にあるように理工系分野における女性活躍の拡大は喫緊の課題である。日本は世界と比べると二周三周遅れ状態である。東工大の学士課程入学者に占める女性比率はわずか14%であり抜本的な増加策が必要であることから、学士入試における「女子枠」の導入を発表した(2022年11月)。多くの女性に東工大を目指していただき、共に新たな未来を創造していこうというメッセージである。

東工大では、2016年の教育改革以降、学士課程に入学した学生は全員「東工大立志プロジェクト」という講義(必須)を受講する。そこでは「志」を持つことが重要であると説いている。大学こそ、挑戦する志を持つことが、未来への責務である。

是非とも多くの皆様の叱咤激励、応援をいただければ幸いです。

<参考文献>

- [1] <https://www.wise-sss.titech.ac.jp/whats/outline/>
- [2] <https://www.titech.ac.jp/news/2022/064017>
- [3] <https://www.dlab.titech.ac.jp/>
- [4] <https://www.iir.titech.ac.jp/ofr/index.html>

工学院におけるICT分野の研究と産学官連携

東工大工学院の沿革と組織、工学院におけるICT分野の研究組織や産学官連携について紹介する。

国立大学法人東京工業大学
工学院情報通信系 教授
植松 友彦



はじめに

工学院は、工学の基本である機械系、制御システム系、電気電子系、情報通信系、経営工学系の5つの研究分野の教員200名以上からなる、東工大で最も大きな教育研究組織です。2016年の教育改革で刷新された教育カリキュラムを通じてグローバルに活躍できる工学人材を育成すると共に、世界最高水準の研究活動を推進しています。

工学院の沿革と概要

東工大工学院は、2016年に三島良直前学長の下で行われた教育改革において、東工大で最も大きな組織であった工学部（理工学研究科工系）と総合理工学研究科を改組して作られた教育研究組織の一つです。教育改革では、学部と大学院を統合した「学院」という新たな教育研究組織を作り、学科や専攻に代わる組織として、工学院の中に機械系、制御システム系、電気電子系、情報通信系、経営工学系の5系を作り、系ごとに学部から大学院まで一貫したカリキュラムによる教育と活発な研究を行っています。工学院に入学した学部学生は、2年次からいずれかの系に所属して専門教育を受けます。

科学技術創成研究院との関係

工学院以外に所属する教員の中にも、工学院の教育研究活動に協力している教員がいます。代表的な例が、研究組織である科学技術創成研究院に所属している教員です。科学技術創成研究院の教員の一部は、自分の研究分野に近い系の担当教員として、系に所属する学生の教育や研究指導をしています。

工学院の研究分野

工学院の研究分野の構成については、社会の要請に対応するため、各系における教員の研究分野を「研究グループ」に分類し、さらに研究グループを小規模の教員によって構成される「研究フィールド」に細分しています（表1）。この分類の他に、SDGs等のグローバルな研究課題に対応するべく、複数の系を横断する系横断研究グループとして、統合IoT技術グループ、ヒューマンセントリックグループ、スマートパワーグ

表1 工学院における研究グループ

	研究グループ	研究フィールドの一部
機械系	熱流体	エネルギー工学、推進工学、環境熱流体工学
	材料・加工	先進製造技術、先端機能材料、安全・安心技術
	機械システム	システム設計、ダイナミクス、機械要素
	機械系フロンティア	航空宇宙、医工学、人間中心デザイン
システム制御系	制御	インテリジェントロボット、サイバーフィジカルシステム
	先端計測	設計応用計測、コンピュータビジョン・画像処理
	システム解析	非線形・確率力学、計算力学、交通動力システム解析
	システム構築	バイオロボット、AIロボット
電気電子系	回路	集積回路
	波動通信	フォトニクス、無線通信、超音波・光センシング
	デバイス	化合物デバイス、テラヘルツデバイス、グリーンデバイス
	電子材料・物性	スピントロニクス、ナノ・バイオフォトニクス
情報通信系	電力・エネルギー	電気機器、電力系統、パワーエレクトロニクス
	人間情報システム	メディア情報処理、感覚情報処理、知的情報処理
	信号処理	メディア信号処理、逆問題
	通信・ネットワーク・セキュリティ	通信方式、情報理論、通信ネットワーク
経営工学系	集積回路・計算機	デジタル集積回路、アナログ集積回路
	情報通信統合	高度分散情報通信システム
	コーポレート・システム創成	企業ガバナンスシステム、経営戦略・マーケティング
	先進マネジメント・バリエーション創成	オペレーションズ・マネジメント、インダストリアル・システム
系横断グループ	分析技術創成	オペレーションズ・リサーチ、数値・情報技術
	エコノミック・サイエンス	マクロ経済学、数量経済学、ミクロ経済学・ゲーム理論
	統合IoT技術	無線通信、集積回路、サイバーフィジカルシステム
系横断グループ	ヒューマンセントリック	ヒューマンミクス、人間中心デザイン、感覚情報処理、サイバーセキュリティ
	スマートパワーグリッド	再生可能エネルギー発電、電力変換、電力制御、電力貯蔵

リッドグループの3つの系横断研究グループが設定されています。また、全学の教育研究組織である「超スマート社会卓越教育院」や他の学院を横断する学院横断研究グループとして超スマート社会グループ(以下、グループをG)が設定されています。これらの横断研究グループは関連する複数の系や学院の教員によって構成されています。これらの研究グループを通じて、未来社会に向けた人材育成や教員独自の独創的研究のみならず、産学連携研究や海外の有力大学や企業との国際共同研究を推進しています。

工学院における ICT 分野の研究

工学院における ICT 分野の研究は、学院横断研究グループの超スマート社会 G を中心として実施されています。具体的な体制は、工学院の系横断グループである統合 IoT 技術グループ、ヒューマンセントリックグループの2つの系横断研究グループと超スマート社会卓越教育院が連携して研究活動を推進しています(図1)。

研究内容としては、本特集でも取り上げている、5G/6G 技術、平面アンテナ、ミリ波・テラヘルツ波 IC 技術、光集積回路、自動運転のための通信技術やスマートオーシャンのための通信インフラの他、サイバーフィジカルシステムやインテグレイテッドロボティクスなどが挙げられます。

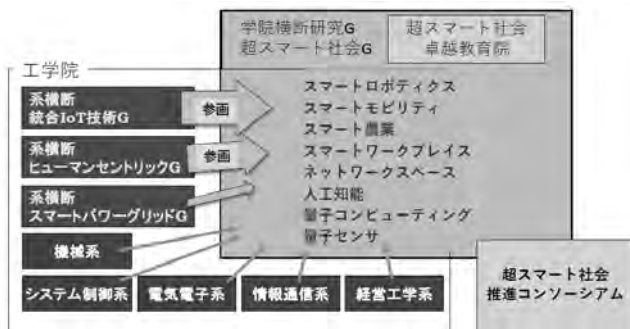


図1 工学院における ICT 分野の研究体制

工学院における産学官連携

工学院においては、年間約 200 件の共同研究を企業と実施しています。そのうち、研究内容を公開できるものが「共同研究講座」です。現時点では6つの企業と共同研究講座を実施しており、工学院産学連携室のホームページにおいて、その研究内容が公開されています。また、超スマート社会卓越教育院を支援する

ために設立した次世代型社会連携教育研究プラットフォームである「超スマート社会推進コンソーシアム」では、参画企業と超スマート社会卓越教育院の間で、共同研究、人材育成、フォーラム開催、インターンシップ、One-Day School などの産学連携による教育研究活動を行なっています。

更に、工学院の教員が主導している産学官の共同プロジェクトとして、文科省による次世代 X-nics 半導体創成研究拠点形成事業、総務省による電波資源拡大のための研究開発「第5世代移動通信システム(5G)の更なる高度化に向けた研究開発」、NICT による Beyond 5G 研究開発促進事業ミリ波無線通信、NEDO の次世代コンピューティング技術開発などがあります。これらの産学官共同研究の幾つかについては、この特集でも概要を説明しています。

最後に、工学院の各教員の研究内容が分かるように、工学院産学連携室のホームページと工学院パンフレットのダウンロードサイトを以下に示します。

■ 工学院産学連携室

<https://icu-seng.e.titech.ac.jp/node/23>

■ 工学院パンフレット

<https://www.titech.ac.jp/pdf/pub-30296-ja.pdf>

工学院主催のビジネスコンテスト 「ExS チャレンジ」 表彰式

工学院 ExS Challenge は 2021 年度から開始した東工大初のビジネスチャレンジコンテストであり、学生や若手研究者がエンジニアリング (E: Engineering) を生かした持続可能社会 (S: Sustainable Society) の実現を目指す事業構想を競うものです。初年度の 2021 年は 20 グループが参加しました。



表彰式の様子
(2021年12月21日開催)

オープンイノベーションを活用した産学連携活動 ～ 新市場創設ためのイノベーションエコシステム (大学城下町)* ～

大学の研究成果を社会実装する目的でオープンイノベーションを活用する企業が増えてきている。こうした企業との連携活動の最前線で活躍する東工大オープンイノベーション機構の活動を紹介しますと共に、未来のオープンイノベーションの動向について展望する。



* 大学城下町構想:「大学城下町」とは、大学が知の源泉となり、スタートアップがプロトタイプを創出し、大企業が大量生産して市場創出を担う、というイノベーション・エコシスの構想を示した概念である。

国立大学法人東京工業大学 副学長 (産学官連携) 学長特別補佐
研究・産学連携本部 副本部長
オープンイノベーション機構 副機構長・統括クリエイティブマネージャ 教授
大嶋 洋一

オープンイノベーション [1] とは

自分の研究成果が社会に貢献することは、研究者にとって研究者冥利に尽きる場面の一つです。この場をオープンイノベーションという手法を用いて支援するのがオープンイノベーション (OI) 機構の基本ミッションです。

「イノベーション」の定義は有識者によって様々ですが、本稿では「新しい社会的価値を創造し、新市場を通じて当該価値を提供する新製品や新サービスを普及させ、世の中に受け入れてもらう活動」と定義します。また、「オープン」については、「他人と連携して活動すること」という意味で十分です。

そうすると、大学と企業の「オープンイノベーション」とは、「大学と企業が連携して、新しい社会的価値を創造し、新市場を通じて当該価値を提供する新製品や新サービスを普及させ、世の中に受け入れてもらう活動」と定義できます。オープンイノベーション (OI) 機構はこの活動を支援する機関ということになります。

オープンイノベーション (OI) 機構 [2]

東京工業大学では、2019 年度に文部科学省の公募した「オープンイノベーション機構の整備事業」に採択され、OI 機構の活動が本格化しました。東工大のOI 機構には、以下にご紹介する 4 つの特徴があります (図 1)。

① 組織対組織の連携

OI 機構の産学連携活動が従来のものと異なるのは、「組織」対「組織」の連携を推進している点です。「組織」対「組織」の連携で重要な点は、企業も大学も経営層から研究者に至るまで各階層の関係者がコミュニケーションの取れる体制が整備されることです。この体制整備は、研究開発を持続的に行うために重要な基盤となります。一般に、企業も大学も経営者層、研究企画層、研究者層は、それぞれ異なった視点で研究開発を捉えています。このためコミュニケーションを取って相互理解を深めながら研究開発を進めることが重要となり

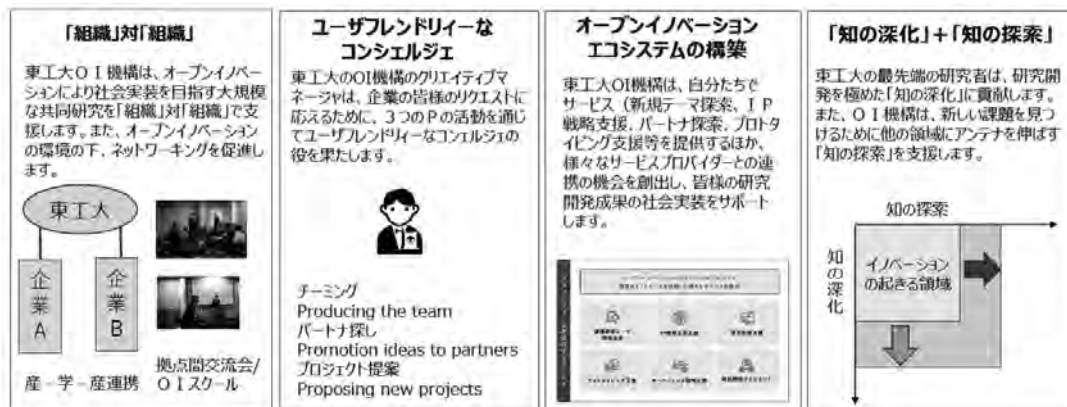


図 1 東工大オープンイノベーション機構の特徴

ます。特に、大学の研究開発のように長期的な視点で研究開発を行っている機関との連携にはこの相互理解が欠かせません。この体制を整備することで、個人レベルではなし得なかった組織としてのチーム力を発揮することができます。この「組織」対「組織」の研究体制の構築がOI機構の活動の第1の特徴となります。本学では、この体制は協働研究拠点という形で具現化されています。

② コンシェルジュとしての役割

近時の社会的課題を解決するためには、一人の研究者の研究成果だけでは、困難なケースが増えています。たとえば、Beyond 5G 世代のアプリケーションの開発を目指すというような場合には、インフラ環境、通信デバイス、ソフトウェア等、通信産業に関連する関係者全体で取り組む必要があり、求められる技術も多様です。こうした広範な課題に対応するために学内の研究者のチームングをサポートするのがOI機構の役割となります。企業のニーズと本学の人的リソースの特徴を理解した上で、所望のチームングを実現する点は、ちょうど、顧客のリクエストとホテルのサービスを熟知して、顧客の期待に応えるコンシェルジュのサービスと類似していることからOI機構のメンバーは、自分達を「コンシェルジュ」と称しています。

企業関係者との対話を行いながら、チームングをしていく過程は、想いを形にするデザイン思考の過程そのものであり、OI機構の活動の第2の特徴となります。

③ イノベーション・エコシステム環境の整備

個々のイノベーション創出活動と同様にイノベーションが持続的な起こるイノベーション・エコシステム環境の整備は極めて重要です。

研究開発を担う大学と企業の研究者は、研究成果を出しさえすれば、それに続く社会実装は研究者が属する企業が担うものだと思っています。しかし、社会実装に至るまでには、特許化支援、マーケティング支援等、様々な専門家や事業化支援サービスが必要です。こうした事業化に必要な人材やサービスが連携可能なように整備された環境を構築することがイノベーション・エコシステムの構築事業ということになります。

また、近時の産学連携は、企業として新しい領域に踏み出すためというケースが多くなっています。当該新しい領域では、大企業といっても異分野であり、必ずしもサポートが可能な領域とは限りません、そこで、

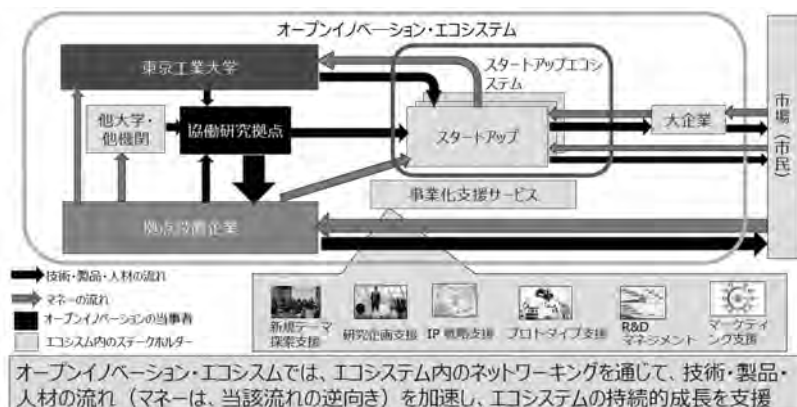


図2 東工大オープンイノベーションエコシステム

新しい技術を核にスタートアップを設立し、新市場創設を狙うという手段も有力な社会実装の手段となります。このスタートアップを活用して社会実装できるスタートアップ・エコシステムもイノベーション・エコシステムの一部として重要となります。

さらに、近時は、研究開発の多様化に対応するために大学間による連携、企業-大学間のインターンシップの活用を含めたOJT、リカレント教育を含む人材育成等、研究者のネットワークもイノベーション・エコシステムの人材面で重要な要素です。

何を作るのかを悩む時代においては、大学が知の源泉となり、スタートアップがVC等の金融機関の支援を受けてその知を具体化したプロトタイプを作り、大企業がプロトタイプを大量生産して市場創設を行う。そして市場を通じて得られた資金や新しい技術課題が、企業やスタートアップ、VC等から大学に還流される、こうした技術と資金の循環サイクルが生まれる大学を中心に構築されるイノベーション・エコシステムは極めて重要であり、OI機構にとって、イノベーション・エコシステム環境整備活動は重要な活動の1つであり、第3の特徴となります。

④ 両利きの研究開発のサポート

「両利きの経営」は、チャールズ・A.オライリー教授が経営の場面で提唱している概念ですが、研究開発の場面でも応用できるという意味で、ここでは「両利きの研究開発」と称しています。

大学は、従来、基礎理論や分析が得意ということで、研究開発の深堀をするという観点での貢献を求められることが多かったように思います。この研究開発のベクトルは「知の深化」の方向に向かっており、連続的イノベーションとして大学の研究成果を活かす重要な方向性の1つです。

近時、もう一つの「知の探索」の場面でも大学の研

究開発が役に立つ場面が増えてきています。その理由は、企業にとって従来の市場の延長線上ではない、新しい市場に参入したいという場面で、当該新しい市場の基礎なる研究者との連携を希望する企業が増えてきているためです。例えば、農機具企業が、自動運転の技術を活用して新市場に参入したいという場合に、無線技術に関する知見が無い場合を想定してみましょう。こうした企業は、無線技術はおろか、無線産業自身についても詳しくないので、無線分野の有識者である大学の研究者にパートナーとして助言を求める、というのは理にかなっています。OI機構は、企業の「知の探索」の場面、換言すると不連続なイノベーションにチャレンジする場面でもサポート活動を展開しており、OI機構の第4の特徴となります。

協働研究拠点 (図3)

東工大では、OI機構が支援する共同研究については、大学内に協働研究拠点を設置することを推奨しています。

協働研究拠点には、柔軟性、持続性、拡張性という3つの魅力的な特性があります。

まず、柔軟性という観点では、研究テーマの進捗を管理し、社会ニーズ、経営方針の変化等によるテーマの追加や統廃合を可能にします。協働研究拠点の研究開発活動は、担当するクリエイティブマネージャがプロジェクトに伴走し、複数の研究テーマに関して定期的な成果報告会等を通じて日々のマネジメントを行います。日頃の進捗管理を丁寧に行う事で、変更が必要な際に、研究開発の方向性について柔軟に対応できるのが協働研究拠点の特徴の一つです。

次に、持続性という観点では研究企画機能が密接な

関係を有します。協働研究拠点では研究企画を担当する部門を必ず設置します。この研究企画部門により、協働研究拠点では、常に新しい研究テーマを探索しています。大学には様々な研究者が個性的な研究開発を行っています。これらの研究開発から、自社にとって必要な研究テーマが次々と見出させることによって協働研究拠点の活動は持続性を備えることになります。

最後に、拡張性という観点では、大学がネットワークの核となり、ハブ機能を提供することで、一企業ではなし得なかった他企業・他大学等との連携を実現します。この機能は、大学が中立的な立場であり、広く門戸を開いているオープンな組織だからこそ実現できる機能であり、大学に設置している協働研究拠点ならではの特徴です。

さらに、人材育成という観点では、協働研究拠点の参加者向けにオープンイノベーション(OI)スクールを4,5回/年開催しています。OIスクールでは、研究者にとって共通的・社会的に注目されている話題について当該話題の専門家を講師として招きます。講師から基礎的な話を聞く情報収集の機会に留まらないように、講演後に講師を含めた参加者とディスカッションをする機会を設け、オープンイノベーションに不可欠な研究者のネットワーク形成力の養成を支援します。

協働研究拠点を設置するための要件を図3に示しました。国内の大学の通常の個別の共同研究は、平均的に300万円/年、研究期間は1年(必要に応じて更新)ですから、協働研究拠点は研究費の規模、研究期間ともに大型の共同研究となります。

現在活動している13の協働研究拠点は、技術分野、規模等が異なり、いずれも個性ある活動を続けており、今後の研究成果が期待されています。

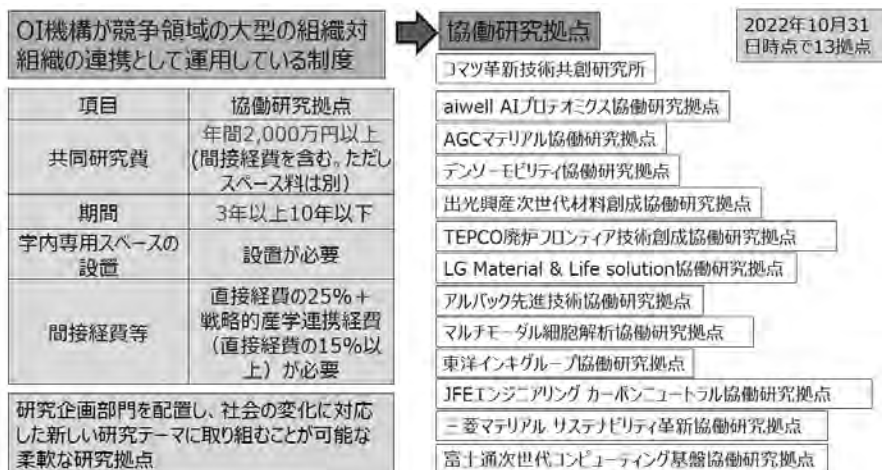


図3 協働研究拠点

今後のオープンイノベーションの方向性

協働研究拠点を中心に東工大 OI 機構の産学連携活動を紹介してきましたが、当該活動の現場では日々新しい課題が発生し、それを解決するために進化を求められています。そこで、産学連携の最前線で起きている変化についてご紹介します。

その一つが大学間の連携体制の充実です。

産学連携のコンシェルジュとして期待に応えるためには、自分がアクセスし、提供できるサービスや資産の質と量の確保が重要です。

しかしながら、学内の資産のうち、特に、人的リソースは有限であり、そう簡単に増強することはできません。コンシェルジュとしての活動範囲を拡充するためには、学外の人的リソースにアクセスできる仕組みが必要となります。

そこで、東工大では、学外の人的リソースへアクセスできるための仕組みづくりを始めています。

第1に、医科歯科大学との統合です [3]。この統合により、これまで自分達には提供ができなかった、医療系の人材リソースを専門家リストに加えることができるようになりました。医療の専門家の参画は、今後成長が見込まれるヘルスケアの分野等での医学的見地からの評価等、研究成果を社会実装するうえで大きなアドバンテージとなります。産学連携のコンシェルジュにとっても大きな武器となります。

第2に、工学系大学としてのネットワークの強化です。2022年11月、東工大は、豊橋技術科学大学及び長岡技術科学大学との人材育成の協定を締結しました [4]。この協定は、人材育成プログラムの共有からスタートしますが、共同研究の際に、相互の研究者が相乗りして参加できるような連携も視野に入っています。企業にとって、実効的に選択できる研究者が増えることは大きな魅力となるはずですが。



図5 東工大-九工大産学連携交流会

第3に、アカデミア牽引型のリモートイノベーションエコシステムの構築です。コロナ禍では、リモートで会議をすることが日常化し、物理的に離間しても共同作業が可能となっています。他方、地方では、産学官の人的リソースが少ないため、イノベーション・エコシステムの構築が困難です。そこで、地方と都市とネットワークを構築することで、リモート型のイノベーション・エコシステムの構築にチャレンジしています。ここでイノベーションの源泉を提供する大学がイニシアチブをとることで、持続的なエコシステムの活動ができないかを探索中であり、現在東工大は、北九州市との間で九州工業大学との連携を通じて実証実験を進行中です (図5)。この事例が成功すれば、海外との連携へも応用可能だと思っています。

まとめ

以上見てきたように、東工大には、自然科学の研究開発と同様に、新しいイノベーションを起こすための支援をする OI 機構が整備されています。研究成果が社会に受け入れるためには、研究者のみならず OI 機構によるサポートが貢献していることをご理解頂ければ幸いです。

参考情報

- [1] 「オープンイノベーション」は、ハーバード大学のヘンリー・チェ スプロウ教授によって提唱された概念です。
- [2] <https://www.o-i-p.titech.ac.jp/index.html>
- [3] <https://www.titech.ac.jp/news/2022/064662>
- [4] <https://www.titech.ac.jp/news/2022/065325>

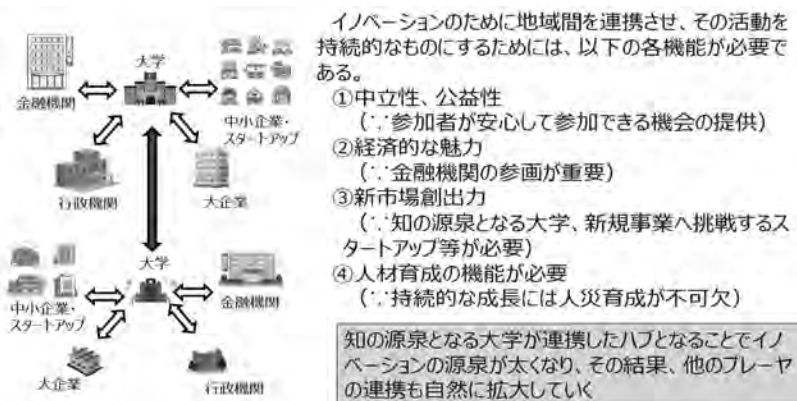


図4 アカデミア牽引型のリモートイノベーションエコシステム

超スマート社会推進コンソーシアムが推進する オープンイノベーションとオープンエデュケーション

～ 研究、教育、共創の三位一体で展開する産学連携の新たな取り組み ～

超スマート社会（Society 5.0）の実現に向けて超スマート社会推進コンソーシアムが進める産学官連携による新たな教育研究プログラムを紹介する。



マッチングワークショップ パネル展示の様子
(2022年11月開催)



国立大学法人東京工業大学
超スマート社会推進コンソーシアム事務局
工学院 特任教授
福田 英輔

超スマート社会推進コンソーシアム

超スマート社会推進コンソーシアムは、来たる超スマート社会（Society 5.0）を牽引するリーダーを養成するため、産官学が連携して、人材育成から研究開発までを統合した次世代型社会連携教育研究プラットフォームを共創することを目的に、2018年10月に設立された。2023年1月現在では、研究機関、自治体、民間企業などから表1に示す54機関（個人会員を除く）が参加し、超スマート社会へ向けたオープンイノベーションとオープンエデュケーションを推進している。超スマート社会推進コンソーシアムには、図1に示すように、全体のステアリングを行う運営委員会の配下に3つの独立の委員会が設置されている。①超スマート社会推進委員会は、超スマート社会に向けたネットワークの場の提供を役割としており、超ス

マート社会推進フォーラム等の企画開催や、One-Day Schoolの提供による社会啓発などを行なっている。②社会連携教育運営委員会は、人材育成とキャリア支援を役割としており、2020年4月に東京工業大学に設置された超スマート社会卓越教育課程との連携による人材育成や、オフキャンパスプロジェクト（インターンシップ）の支援などを行なっている。③異分野融合研究推進委員会は、研究開発チームのコーディネート役割としており、マッチングワークショップの開催や、超スマート社会教育研究フィールドの構築などを行なっている。超スマート社会教育研究フィールドは、超スマート社会へ向けた研究開発を行うオープンイノベーションフィールドであり、コンソーシアム会員であれば誰でも自由に活用することができる。

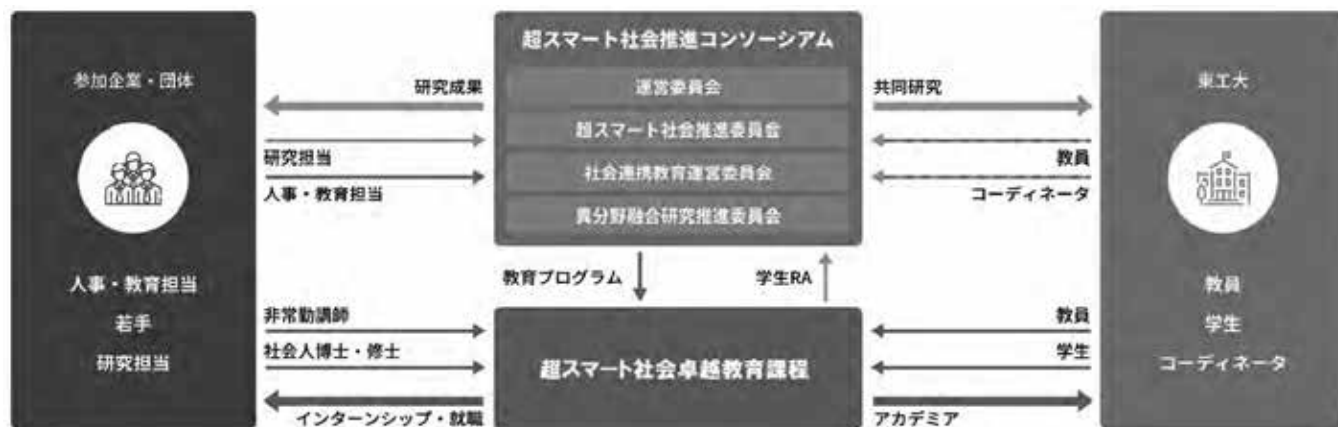


図1 超スマート社会推進コンソーシアム

表1 超スマート社会推進コンソーシアム（2023年1月現在）

1	国立研究開発法人 海洋研究開発機構	19	株式会社光電製作所	37	マツダ株式会社
2	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 情報・人工工学領域	20	コマツ	38	三菱地所株式会社
3	国立研究開発法人 情報通信研究機構 ワイヤレスネットワーク総合研究センター	21	株式会社ジェイテクト	39	三菱地所設計
4	国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構	22	ショーボンド建設株式会社	40	三菱電機株式会社
5	国立研究開発法人 理化学研究所 革新知能統合研究センター	23	ソフトバンク株式会社	41	株式会社安川電機
6	国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構	24	株式会社デンソー	42	横河電機株式会社
7	aiweil株式会社	25	東海旅客鉄道株式会社	43	楽天モバイル株式会社
8	アズビル株式会社	26	株式会社東急総合研究所	44	株式会社リコー
9	アンリツ株式会社	27	株式会社東芝	45	株式会社 ROCKY-ICHIMARU
10	株式会社イーキ	28	株式会社トレスバイオ研究所	46	農林水産省
11	ウミロン株式会社	29	日本精工株式会社	47	大田区
12	株式会社ACSL	30	日本電気株式会社	48	川崎市
13	AGC株式会社	31	日本電信電話株式会社	49	目黒区
14	NTTアーバンソリューションズ株式会社	32	株式会社日立製作所	50	横浜市
15	LG Japan Lab 株式会社	33	パナソニック株式会社	51	独立行政法人中小企業基盤整備機構 関東本部
16	川崎重工業株式会社	34	富士通株式会社	52	公益財団法人笹川平和財団海洋政策研究所
17	株式会社クボタ	35	株式会社ホンダリサーチ・インスティテュート・ジャパン	53	一般社団法人大丸有環境共生型まちづくり推進協会
18	KDDI株式会社	36	牧野アライズ機構株式会社	54	一般社団法人マシオン・オープンバージョン機構

超スマート社会教育研究フィールド

本コンソーシアムでは、参加機関と連携して、超スマート社会を創造するオープンイノベーションプラットフォームの構築を進めている。これまでに大岡山キャンパス、ならびにすずかけ台キャンパスに表2に示すような6つの教育研究フィールド（スマートモビリティ、スマートロボティクス、量子科学、人工知能、スマートワークプレイス、スマート農業）を構築し、最先端の超スマート社会の実現に向けた様々な研究・実証実験を行っている。これらの教育研究フィールドは、我々が目指す超スマート社会の縮図という位置づけであり、コンソーシアム参加機関であれば誰でもが教育と研究に活用することができるオープンイノベーションフィールドである。次にそれぞれの教育研究フィールドの概要を述べる。

① スマートモビリティ

自動運転やそれを活用したモビリティサービスに関する研究プラットフォームで、実際に乗車体験が可能な2台の自動運転車両と最先端のワイヤレスネットワーク（5G、ミリ波帯無線LAN）を用いた教育・研究のプラットフォームを構築している。この上で、光学画像やLiDARでの計測情報など、あらゆるセンサ情報を流通・処理させることで新たなモビリティサービスの創出と超スマート社会の実現を目指している。

② スマートロボティクス

スマートロボティクス教育研究フィールドでは、① Robot Zoo Sky、② Robot Zoo Aqua、③ Robot Zoo

Land、④ Smart Manufacturing の4つ領域のロボットの研究開発を進めている。Sky は異種のドローンや移動ロボットを複数台同時に制御するプラットフォームを構築し、農業分野におけるマルチドローンの活用を進めていく予定である。Aqua では、大型水槽、光学式モーションキャプチャシステム、および水上ドローンを導入し、水上ドローンの自律航行に関する研究開発を進めている。Land では、協働ロボット、野外フィールド用4脚ロボット、多機能ロボットアクチュエータモジュールを活用して、災害対応・インフラ整備・高齢化等の社会課題を見据えた実践的研究開発の推進を目指す。Manufacturing では、5軸加工機を活用し、複雑な一体部品を誤りなく加工するための一連の加工プロセスを研究開発している。これにより、高付加価値なマニファクチャリングの実現を目指している。これらのフィールドにより、実践的な研究・教育の場を構築し、超スマート社会を支えるロボティクスを創出している。

③ 量子科学

量子科学の領域では、次世代に向けた量子コンピューティングの実現に向けて、量子ビットを実装・評価するための、極低温における量子現象を観測するための高精度で低雑音な測定系を構築している。量子センサに関しては、量子効果を利用して微小な磁界を検出できる超伝導量子磁束干渉計の実現に向け、従来よりも高感度な検出が可能な量子センサの研究・応用の探索を進めることで、高度な情報処理が求められる超スマート社会構築への貢献を目指している。

表2 超スマート社会教育研究フィールド一覧（2022年10月1日現在）

スマートモビリティ		人工知能	
	自動運転やそれを活用したモビリティサービスに関する教育研究プラットフォームである。実際に体験可能な自動運転車と最先端ワイヤレス（5G、ミリ波）を用いたフィールドを構築している。		人工知能に関する教育研究プラットフォームである。スパコン「TSUBAME」とWi-Fi6により機械学習サービスの活用基盤を構築している。
スマートロボティクス		スマートワークスペース	
	陸、空、水中、製造分野に関するロボット活用の教育研究プラットフォームである。野外用4脚ロボット、ドローン、水中/水上ドローン、デジタルマニファクチャリング技術などを取り揃えている。		より良い働く場の構築を目指すスマートワークスペースに関する教育研究プラットフォームである。多様なセンサやAIを用いた空調制御などポストコロナ時代のワークスペースを構築している。
量子科学		スマート農業	
	次世代の量子コンピューティング、量子センサに関する教育研究プラットフォームである。超高速次世代量子コンピュータと超高感度量子センサの研究・応用を実施している。		日本型の小規模農業が抱える問題に対応するためのスマート農業に関する教育研究プラットフォームである。AI・IoT・ロボット技術を駆使して、高品質作物を自動安定生産可能な遠隔農業技術を構築している。

④ 人工知能

人工知能教育研究フィールドでは、本学のスーパーコンピュータ TSUBAME 上に搭載されている GPU を利用し、実際に機械学習ツールを動作させ、音声認識や音声合成、物体認識など、さまざまなアプリケーションが実行できる環境を提供している。「社会的課題解決型データサイエンス・AI 研究推進体 (DSAI: Data Science and Artificial Intelligence)」を始動させ、大学院生を対象とする人工知能教育の準備を進めており、Wi-Fi6 の無線 LAN を用いた実験環境を整備し、高速回線を用いた機械学習サービスの活用基盤を構築している。

⑤ スマートワークスペース

スマートワークスペース教育研究フィールドは、より良い働く場の構築を目指す研究プラットフォームである。ここでは、大手町のサードスペースに配備した熱画像センサや CO₂ センサと AI を連携させた温熱快適性判定システムや、シミュレーションと MR (Mixed Reality) を統合した飛沫核投影システムを構築し、室内環境や執務者のバイタルサインをセンシングし、AI を用いたスマートな空調制御により快適で生産性の高い環境の構築を進めている。さらに、ウェルネスやポストコロナというキーワードも視野に、働く場のあり方を検証していく。

⑥ スマート農業

日本型の小規模農業が抱える問題に対応するため、スマート農業に関する研究プラットフォームの構築を進めている。東工大すずかけ台キャンパスに約 2 アールの圃場を構築し、電気、通信、水道、定点観測センサネットワークを完備し、係留ドローンが飛行可能なスマート農業フィールドを構築している。土壌改良、その後の大豆の作付けを完了しており、生産性の高い農業を実現するための技術基盤を開発していく。

今後は、災害時の建物の継続使用性の早期判断や都市のレジリエンス向上に貢献する「スマートビルディング」、次世代の社会インフラである SSI (Sustainable Social Infrastructure) を目指す「スマートインフラメンテナンス」を推進するとともに、漁業の効率化や海洋資源探査に向けて「スマートオーシャン教育研究フィールド」を構築していく計画である。

社会人向けリカレント教育への取り組み

超スマート社会推進コンソーシアムでは、リカレント教育の一環として、2021 年度から、コンソーシアム参加機関向けに 5 つの分野 (人工知能、量子科学、スマートモビリティ、ロボティクス (スカイ)、ワークスペース) について教育研究フィールドを体験実習

表3 2021年度One-Day Schoolのプログラム

教育研究フィールド		演習内容（講義・実習）	開催場所
スマートモビリティ		自動運転、ITS、次世代無線通信技術に関する講義 自動運転車両を用いた演習	大岡山 キャンパス
量子科学	コンピューティング	量子現象の観測実験を通じた量子ビット素子冷却 精密測定に必要な技術に関する実習	
	センサ	量子センサを構成する超伝導体原子層薄膜試料の作製と物性測定技術に関する実習	
人工知能		ニューラルネットワークの原理、勾配降下法とバックプロパゲーション、RNNとCNNの説明、 TSUBAMEの紹介、Google Colabを使った演習、言語獲得モデルの実験	
ロボティクス（スカイ）		ROSの概要、フィードバック制御、マルチロボットの分散協調制御 に関する講義とROSを用いた演習、マルチドローンを用いた実験デモ	
ワークスペース		スマートワークスペース教育研究フィールドの紹介、導入技術・センサの説明 人の温熱快適性・飛沫挙動の見える化体感	大手町 3×3Lab Future



図2 スマートモビリティの実習の様子

できる機会を提供している。実習内容を表3に示す。ここでは、One-Day Schoolのプログラムとして、1日でひとつの教育研究フィールドに関する講義と演習を行い、コンソーシアム参加機関に教育研究フィールドを概観し今後の活用や研究開発を検討するための一助として頂くことを目指している。ひとつのフィールド当たりの参加人数を少人数に限定することで、担当教員との密接なディスカッション、ならびに参加者全員が教育研究フィールドに直接触れていただく機会を担保し、活発なディスカッションや演習体験を通して、学び直しの機会を提供するとともにコンソーシアム参加機関への技術的貢献を進めた。今後は、コンソーシアム参加機関だけでなく、一般の企業にも参加いただける仕組みづくりを目指す。

更に同様の内容は、超スマート社会卓越教育院に登録している学生向けにも異分野融合研究企画集中演習プログラムとして提供し、自らの専門分野と異なる知見の獲得の一助となっている。

まとめと今後の展望

本稿では、超スマート社会推進コンソーシアムの概要と6つの教育研究フィールドと、それを活用した人材育成及び研究開発の例を紹介した。本コンソーシアムで構築している、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合する超スマート社会サービスプラットフォームは、農業、製造、物流、医療など他の分野にも応用できる柔軟性と拡張性を持った設計となっており、今後到来する超スマート社会の基盤となると考えられる。さらに本コンソーシアムは、これらの超スマート社会教育研究フィールドを活用した研究プロジェクトを通して、超スマート社会時代を牽引する人材の育成も行っている。本稿を読んで頂いた読者の中で、これらの活動にご興味がある方は、是非、超スマート社会推進コンソーシアム事務局までご連絡いただければ幸いである。

<参考文献>

- [1]超スマート社会推進コンソーシアム
<https://www.sss.e.titech.ac.jp/>
- [2]超スマート社会教育研究フィールド
https://www.sss.e.titech.ac.jp/re_fields/

大岡山5G/6G実証フィールド

～ 超スマート社会の実現に向けて ～

超スマート社会推進コンソーシアムは産官学共創により超スマート社会の実現を目指している。本稿ではその取り組みを加速するためのオープンイノベーションフィールドである大岡山5G/6G 実証フィールドを紹介する。

国立大学法人東京工業大学
 工学院電気電子系 教授
 超スマート社会卓越教育院 院長
 阪口 啓



大岡山の基地局アンテナとともに（2022年2月）

5G/6G と超スマート社会

2020年に商用化された5G（第5世代移動通信システム）であるが、何が出来るのか？？と知っている方も多いと思う。正直に言うとまだ何も出来ていませんと言うのが現状である。ミリ波などの高周波帯を用いる5Gはカバレッジが狭く、4Gまでとは異なるエリア展開が必要である。またたとえミリ波5Gが超高速通信を実現したとしても、アプリケーションサーバが接続されているインターネットがボトルネックとなり、結局4Gと同程度のデータレートになる。そもそもスマホから情報を受け取る人間の容量に限界があるため、4Gのデータレートで十分である。などが現状であろう。

ここでがっかりしないで欲しい。実は5Gは、さらに次の世代の6Gとセットで世界に革命的变化をもたらす。図1を観てもらいたい。3Gと4Gのセットがもたらした革命は何か？それは勿論スマートフォンである。AndroidやiOSなどのサービスプラットフォームが創出されたことで、任意のスマホに任意のアプリをダウンロードして用いる現在の利便性の高い社会が実現された。では、5Gと6Gのセットがもたらす革命は何か？それは超スマート社会である。これから創出される超スマート社会サービスプラットフォームを用いることで、サイバー空間とフィジカル空間が融合され、社会に革命的進化をもたらされる。4Gまでとは異なるエリア展開を行い、アプリケーションをインターネットの手前のエッジサーバに導入し、またスマホを介さずにサイバー空間とフィジカル空間を直結することで、5Gと6Gの真価が発揮されるのである。

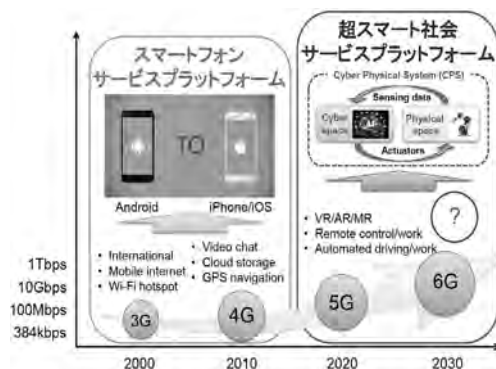


図1 2 Generations = 1 Revolution

図2に超スマート社会サービスプラットフォームのイメージを示す。超スマート社会サービスプラットフォームは、フィジカル空間のサービスとサイバー空間のアプリケーションの間に位置し、センサ、データベース、MEC（Multi-access Edge Computing）、5G/6G、クラウドなどを活用して、フィジカル空間のアクチュエータとサイバー空間のデジタルツインを融合する。人間（ユーザ）は、従来のスマホなどを用い



図2 超スマート社会サービスプラットフォーム

てこれらを遠隔から管理運営する新たな立場となり、これによって人間をより自由にする新たな革命である超スマート社会が実現される。はずである。

大岡山 5G/6G 実証フィールド

産官学共創により超スマート社会の実現を目指している超スマート社会推進コンソーシアム [1] は、超スマート社会サービスプラットフォームをオープンイノベーションにより創出し、スマートモビリティやスマート農業などの様々なセクタに応用するために図3に示す大岡山 5G/6G 実証フィールドを東京工業大学のキャンパス内に構築している。

図3中の右上のボックス内のRAN (Radio Access Network) コンポーネント、すなわちミリ波と Sub 6 の RU (Radio Unit)、DU (Distributed Unit)、CU (Central Unit)、MEC、およびアプリケーションサーバが全てキャンパス内に配置され、プライベートな実験局免許により運用されているため、現状の商用5Gを超えた多様な実証実験の実施が可能になっている。またコアネットワークは楽天クラウドイノベーションラボ内に設置され、実証フィールド専用発行したプライベート SIM を用いることで、実験局に認証された市販の端末だけでなく、新たに開発した AR 端末や、将来の自動運転車などを接続することができる。またRAN、コアネットワーク、およびアプリケーションサーバは完全仮想化により構築されており、仮想化コンテナを用いたアプリケーションの分散配置や、コンポーネントの最適配置などを容易に行うことができる。さらにキャンパス内には次世代 ITS (Intelligent Transport System) で導入予定の路側機 (Road Side Unit) が設置されている。自動運転車だけでなく路側機に設置されているカメラや LiDAR (Light Detection

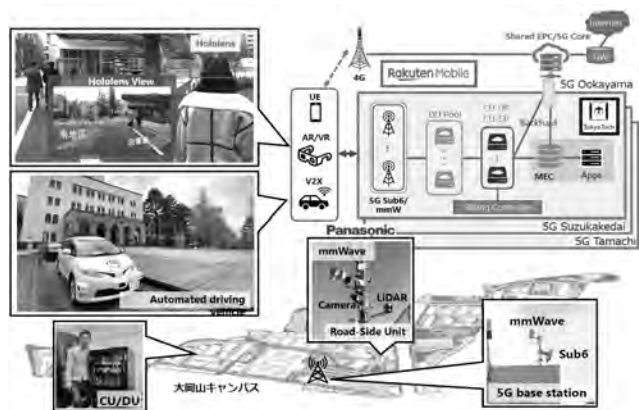


図3 大岡山 5G/6G 実証フィールド

and Ranging) などのセンサデータを MEC サーバにリアルタイムに収集し、キャンパスの 3D マップに統合することで大岡山デジタルツインを構築することが可能になっている。なお大岡山 5G/6G 実証フィールドに関する詳細は文献 [2] を、スマートモビリティに関する詳細は文献 [3] 参照されたい。

図4は大岡山 5G/6G 実証フィールドにおいてスループットを実測した例を示している。ここではアプリケーションサーバを MEC に配置し (インターネットを用いない)、4G LTE をアンカーバンドとして用いる NSA (Non-StandAlone) 構成で、ミリ波のスループットを測定している。図より明らかな様に、ミリ波 5G のスループットは 1.7Gbps となり、4G の 1Mbps より遥かに速い。



図4 スループットの実測例

リピーターを活用したミリ波 5G/6G のエリア展開

前節の図4では、端末から基地局を目視できる見通し環境での特に良好なスループットの例を示したが、見通しの無い環境ではミリ波 5G のスループットは急激に劣化し 4G を下回る。ミリ波は伝搬損失そして回折損失が大きい (地物の裏側に回り込まない) ためカバレッジエリアが小さい。さらに図4の環境では大岡山で有名な銀杏並木があり、銀杏の幹で見通しが遮られるだけでなく、枝や葉が風で揺れるだけでもスループットに影響が出る。すなわち 4G と同様のエリア展開では、カバレッジが狭い上に不安定と何とも使い辛い。

この問題を解決する方法の一つに、ビームフォーミング機能を有するドナーユニットと増幅再放射機能を有するサービスユニットからなるミリ波アナログリピーターがある。早速、図5に示すミリ波リピーターを用いて実証実験を行ってみた。ドナーユニットを見通し内に設置し、見通し外に向けてサービスユニットが再放射する。図6の左側と右側を比較するとリピーターの効果は明らかであり、銀杏並木があってもミリ波のエリア展開が可能になる。なおミリ波リピーターを用いた実証実験の詳細は文献 [4] を参照されたい。

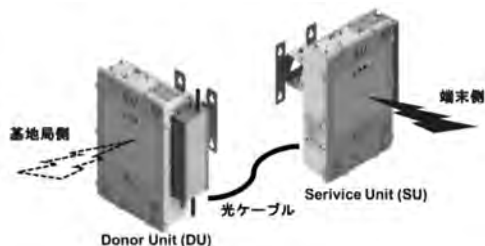


図5 実証実験に用いたミリ波リピーター

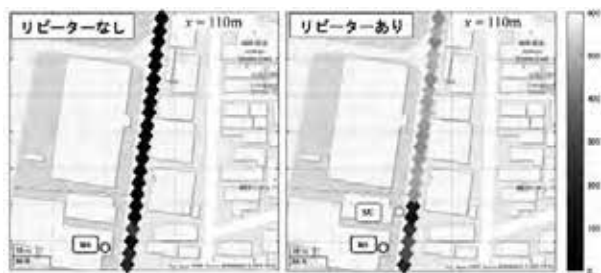


図6 ミリ波リピーターによる5Gのエリア拡張

MECを活用した5G/6Gならではのアプリケーション

最後に大岡山5G/6G実証フィールドで、MECを活用した5G/6Gならではのアプリケーションを動かしてみよう。端末としては、誰でも手に入れることができる5G対応のスマホを用いることにするが、これまでのスマホとは一風異なる使い方をする。

はじめに図7に示す Augmented Information on MECを紹介しよう。これは5G対応スマホをAR端末として使い、ユーザの位置情報を用いて大岡山デジタルツインにある Augmented Information をダウンロードし、リアルタイムにスマホに表示するアプリケーションである。これによりフィジカル空間とサイバー空間がAR端末上で融合し、キャンパス内のナビゲーションや、建物のデコレーション、空に浮かぶ巨大広告など、4Gまででは実現できなかった世界を創造できる。



図7 Augmented Information on MEC

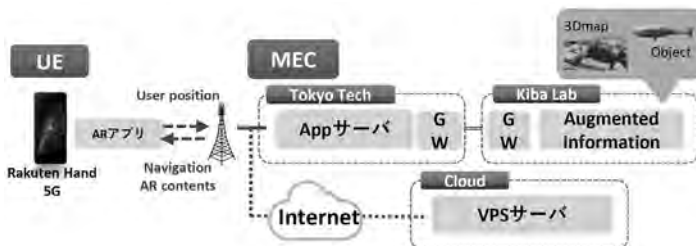


図8 Augmented Information on MEC のシステムアーキテクチャ

図8は Augmented Information on MEC のシステムアーキテクチャを示している。5G対応スマホは、カメラの映像をリアルタイムにMECおよびクラウドに送信し、VPS (Visual Positioning System) により測位することで従来のGPSよりも高い精度で位置情報を推定している。空に浮かぶ巨大広告などの大容量な Augmented Information はMECサーバ上で管理され、ユーザの位置情報に基づき、5Gの特徴である超高速かつ低遅延通信を介してリアルタイムにダウンロードされ、AR端末に表示される仕組みになっている。

次に図9に示す Object Detection on MECを紹介する。こちらはその名の通り、5G対応のスマホで移動する複数の物体を検知するアプリケーションである。カメラの映像を用いた物体検知には、一般的にニューラルネットワークなどの機械学習が用いられるが、スマホの計算能力では、遅延が大きく図9の様な移動する複数の物体を正しく検知することは難しい。ではどうすれば良いか？



図9 Object Detection on MEC

図10は Object Detection on MEC のシステムアーキテクチャを示している。5G対応スマホは、カメラの映像をリアルタイムにMECサーバに送信し、機械学習による物体検知は全てMECサーバで実行される。MECサーバには、スマホに比べて潤沢なGPUが設置されているため、高度な計算を短時間で実行することができる。物体の検出結果をリアルタイムにスマホに送信し、スマホのAR機能を用いて表示するこ

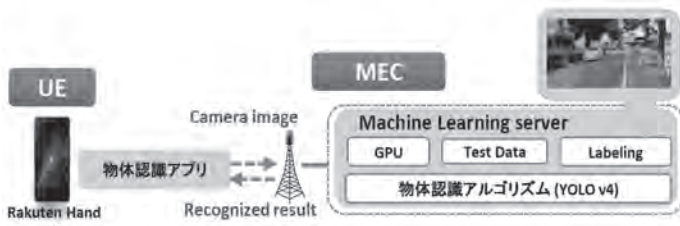


図 10 Object Detection on MEC のシステムアーキテクチャ

とで、移動する複数の物体を検知することが可能になる。本アプリケーションでは、映像伝送の前に簡単な下処理を行うことで、ラウンドトリップで 50ms 以下の低遅延な物体検知を実現している。

現在は、上記 Augmented Information on MEC と Object Detection on MEC を発展させて、図 11 に示すスーパースマートタウン大岡山の構築に取り組んでいる。AR と次世代 ITS を用いた MEC とデジタルツインによる超安全（自転車）運転支援や、AR と 3D オブジェを用いた MEC とデジタルツインによるスーパースマートショッピングなどを創出している。大岡山 5G/6G 実証フィールドや、スーパースマートタウン大岡山に興味がある方は、是非お声掛けを頂きたい。また超スマート社会推進コンソーシアムでは、超スマート社会を共創する同士を随時募集している。人類の未来を一緒に創りましょう！

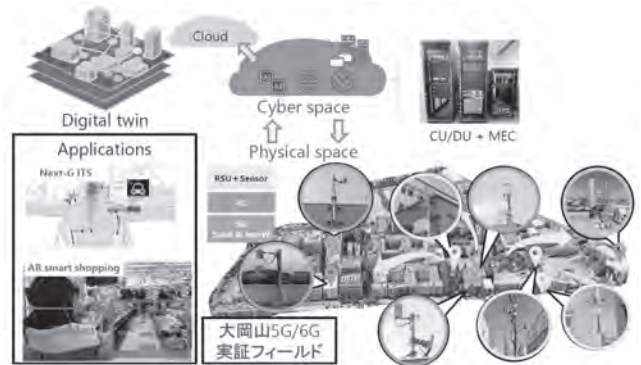


図 11 スーパースマートタウン大岡山

謝辞

本取組みの一部は、情報通信研究機構（NICT）の Beyond 5G 研究開発促進事業（#00101）の一環として行われたものである。ここに記して感謝の意を表したい。

<参考文献>

- [1] 超スマート社会推進コンソーシアム, <https://www.sss.e.titech.ac.jp/>
- [2] 阪口、久保田、福田、中里、朽津、益子, “B5G/6Gにおけるエッジコンピューティングの役割と超スマート社会への展開,” 電子情報通信学会誌, 2023年 2月.
- [3] 阪口、福田、岩附, “東工大スマートモビリティ教育研究フィールドを活用した人材育成と研究開発,” 自動車技術会誌, 2022年 11月.
- [4] 徳川、中里、久保田、阪口、板垣、南里、朽津、益子, “アナログ中継局を用いたミリ波カパレッジエリアの設計と実証実験,” 信学技報, RCS2022-190, 2022年 12月.



工学院電気電子系 阪口・タン研究室

東京工業大学工学院電気電子系の阪口・タン研究室は、荒木純道名誉教授をルーツとし、現在では、阪口啓教授、タンザカン准教授を中心に、渡辺文夫推進アドバイザー、福田英輔特任教授、藤井輝也特任教授、表英毅特任准教授、ウトウ特任准教授、久保田啓一研究員、中里仁研究員、および 2 名の秘書、24 名の学生から成る大所帯の研究室です。無線通信システム全般の研究に取り組んでいますが、特に 4G では MIMO-OFDM 通信システム、5G ではミリ波通信システムの実用化に貢献してきました。次は 6G ですが、最近は超スマート社会にハマっています。



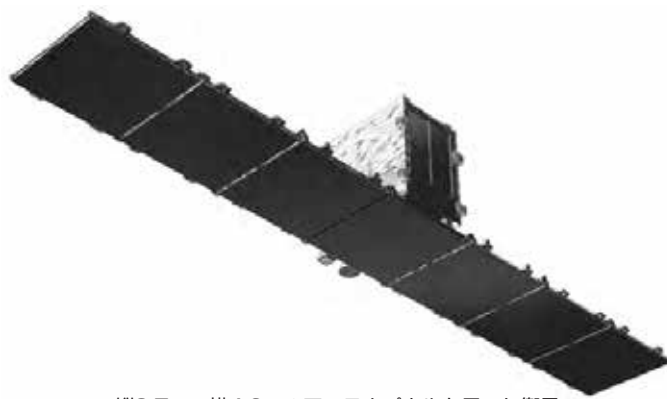
研究室活動風景

「研究室風景」「楽水会（東工大の電気・情報系の同窓会）スポーツ大会」「研究室旅行」

世界にない新しい構造の平面アンテナをつくる

～ 7枚の方形平行平板スロットアレーアンテナを宇宙で展開して合成開口レーダに用いる ～

合成開口レーダは、電磁波を用いることで、昼夜や天候に関係なく地上の様子を観測できます。小型化された多数の衛星による高頻度な観測、人工知能などの高度な画像処理技術により、防災、インフラ、環境、農業、金融等の多くの分野での利用が検討されています。本稿では、その小型衛星搭載合成開口レーダ用に研究開発された平行平板スロットアレーアンテナについて説明します。



縦0.7m×横4.9mのアンテナパネルを用いた衛星
(画像提供：科学技術振興機構)

国立大学法人東京工業大学
工学院電気電子系 教授
廣川 二郎

はじめに

1t以上の大型衛星で実現されてきた合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar, 以下 SAR と略す) を 100kg 級の小型衛星に搭載できるように展開パネル型の方形平行平板スロットアレーアンテナを研究開発しました。衛星全体の軽量化は、衛星およびロケット打ち上げにおけるコストの劇的な削減につながっています。従来の電子機器を多数搭載した高価なアクティブフェーズドアレーアンテナや機械式メッシュ展開アンテナに対して、このアンテナは安価なハニカムパネル*1で構成され低コストで収納性に優れています。1mの地上分解能のために 10GHz 帯で 300MHz の広帯域化を実現しています。多数の小型 SAR 衛星により、世界の経済活動の把握や、災害発生時の迅速な対策の準リアルタイム全天候型広域観測が実現しつつあります。

従来技術との比較

• アクティブフェーズドアレーアンテナ

展開パネル上に多数の電子回路と放射素子を配置したアンテナです。宇宙空間に露出したアンテナパネル上の電子回路の小型化、低コスト化が困難です。また、面密度と質量が提案形式と比較して2倍以上という問題があります。

• メッシュ・膜展開アンテナ

メッシュをケーブルの張力でパラボラ形状に保つ反

*1 軽量化のためにハチの巣形状にしたアンテナパネル

射型アンテナです。展開信頼性や高い面精度の実現のために煩雑な調整が必要です。メッシュや膜の展開が2次元的であり、アンテナビームパターンがほぼ円形に限られるため、観測範囲が数 km に限られ広い観測域が得られません。

• 展開式スロットアレーアンテナ (提案形式)

展開式受動アンテナパネルを非接触で給電します。パネル形状の調整が不要で、展開の高い信頼性、低コスト、数 m²の面積を簡易な展開機能で実現できます。平面パネルの1次元展開方式で観測幅を広くとれる特徴があります。裏面に太陽電池を設置して太陽電池パネルと兼用できます。

アンテナ構造・性能

図1にアンテナ構造を示します。左図は70cm四方の方形平行平板スロットアンテナ7枚を衛星筐体周囲に収納した配置、右図は展開した場合の構造です [1]。右図において、各平行平板導波路の中央部に給電導波管が設けられています。7枚のアンテナを並列給電する導波管は別途設けられており、アンテナ間は隙間を有する2枚のフランジを介して給電されています。アンテナでの電磁波の伝搬経路を矢印で示しています。左の拡大図に示すように、2枚のフランジ*2のうち1

*2 導波管同士を接続する平板。宇宙空間では昼夜の温度差が大きく導波管が収縮するので、伸びても互いに接触しないようフランジ間には隙間がある。

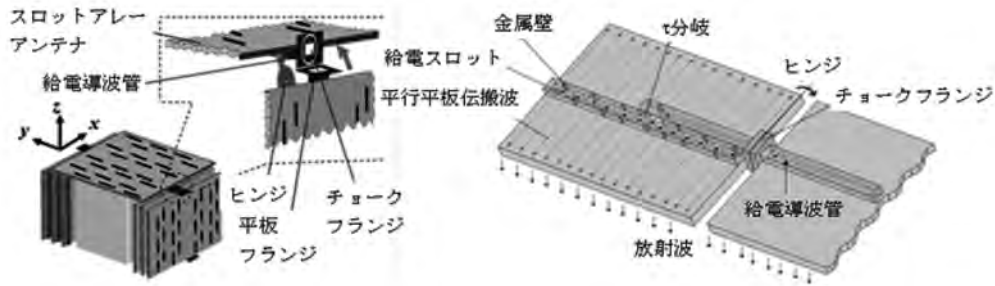


図1 アンテナ構造

枚の給電開口の周囲にはチョーク^{*3}を設け、隙間があっても給電開口端で等価的に短絡され漏れを防いでいます [2]。給電導波管には中央にある τ 分岐^{*4}から両側へ給電されます。給電導波管上には1/2管内波長間隔で結合スロットアンテナを互い違いに傾けて配置し同位相同振幅で励振しています。平行平板導波路上には、図1左図に示すように放射スロットアンテナペアを電磁波の進行方向に1管内波長間隔で並べ、同位相同振幅で励振し外部に電磁波を放射しています [3]。平行平板導波路内にはハニカム構造の誘電体を設け、管内波長を自由空間波長より短くして不要方向への放射を抑圧しています [4]。

図1左図に示すように、x軸方向の電界（地面に対して垂直）を有する電磁波を送受信します。7枚のアンテナを並列給電し、4.9m×0.7mの細長い放射部を実現しました。これにより28kmの広い観測幅が可能となりました。

新規性

• 方形平行平板導波路構造の導入

レーダとして数kWの高出力を扱うため、効率よく電磁波を放射するには伝送損失の小さい中空導波管^{*5}構造を用いた方がよいです。中空導波管構造としては方形導波管が主ですが、多数の方形導波管^{*6}を用いた場合、重量が重くなり衛星搭載では問題となります。軽量化のために多数の方形導波管の側壁を除去して平行平板導波路としました。平行平板導波路は構造が簡易ですが、所望の方向以外にも電磁波が伝搬しやすいため、不要な方向に電磁波が伝搬しないように、放射スロットアンテナペアを電磁波の進行方向に垂直な方

向に対して密に配置しています。外部についても不要な方向へ電磁波が放射しないように、平行平板導波路内に誘電体ハニカムコアを充填しています。

• チョークフランジ構造の導入

SAR用アンテナでは広い観測幅のために細長い形状が必要であり、複数枚の展開型アンテナパネルの構成にします。隣接アンテナパネルには非接触で低損失の導波管で給電する必要があり、アンテナ間の2つのフランジの1つにチョーク構造を導入しています。複数の方角平行平板スロットアレーアンテナへ給電可能となるとともに、打ち上げ時には折り畳んで収納できます。

将来性

現在の構造では、1m分解能を得るために10GHz帯において300MHzの帯域を実現しています。図2にレーダ画像の一例を示します。図2のような明細な画像を昼夜、天候によらず取得できます。

分解能を上げるためには動作帯域を広げる必要があります。その1つの方法として、図1の構造とは異なる図3のような完全並列給電アンテナ [5][6] を提案しています。レイヤ1は積層薄板拡散接合により接合されており、レイヤ2とレイヤ3はねじ止めで固定されています。レイヤ1にある並列給電回路によりすべての放射素子が同位相同振幅で励振され広帯域特性が実現できます。

図3の構造を10GHz帯に適用して帯域1.2GHz、分解能25cmを得ることが期待されています。これが実現できると、夜間でも衛星から人間を識別できるようになります。現在商用で入手できる衛星光学画像の最高分解能は30cmですが、晴れた昼間の観測に限られます。分解能25cmのSAR観測が実現すると、従来は分解能では光学画像が優れ、SARは夜間悪天候

^{*3} 隙間のあるフランジ間から電磁波が漏れないように、フランジ周囲に設けた溝。

^{*4} ギリシャ文字の τ (タウ)の形状をした電力分配回路

^{*5} 断面が長方形をした金属管で、中を電磁波が伝搬する

^{*6} 内部になにも充填されておらず中空になった導波管



図2 レーダ画像(アメリカ南フロリダ)
(画像提供：株式会社 Synspective
(衛星 StriX- α により2021年2月8日12時頃撮像))

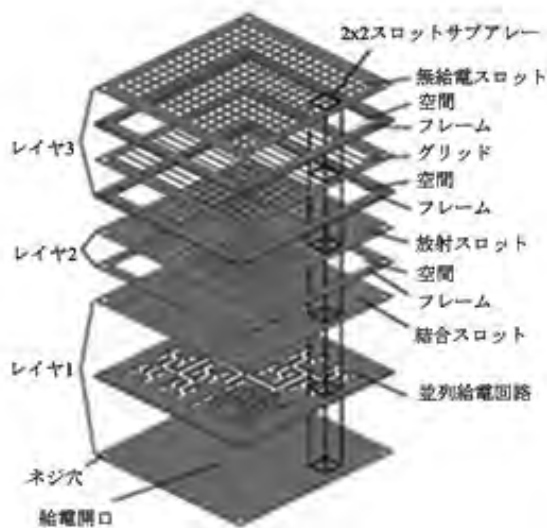


図3 完全並列給電アンテナ

時に光学画像を補完するという位置付けが一変し、全天候での準リアルタイムのSAR観測が光学観測と同等以上の分解能で可能となります。

社会インフラ、国際物流の常時監視等への社会・経済的効果があり、災害時モニター等により、福祉・安全性・快適性などの向上にも貢献できます。地盤の変動、森林・海洋状況の把握などの地球環境保護・保全などの公益性も高いです。このような社会・経済的効果および公益性を有する小型衛星搭載SARのキーデバイスである方形平行平板スロットアレーアンテナの

重要性は極めて高いと考えられます。

本アンテナは、内部に導波管を埋め込んだパネル構造です。このような構造の高機能パネルは、大量生産に適しロケットへの収納性も高い次世代小型衛星形態である平面状のDisk衛星^{*7}、太陽発電衛星の発電一体型パネルなどにも適用可能と考えられます。

本アンテナ単体としてもレーダ用だけでなく通信用等としても応用が可能です。高効率・広帯域・簡易構造・軽量である特長を生かし、100GHzを超える周波数での適用が考えられ、第5世代移動通信の次の世代の方式への対応も高く期待できます。

謝辞

本研究開発にあたり、ご協力をいただいている国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所齋藤宏文名誉教授、国立研究開発法人科学技術振興機構と株式会社 Synspective の関係各位に深く感謝します。

<参考文献>

- [1]Budhaditya Pyne, Hirobumi Saito, and Jiro Hirokawa, "Slot-Array Antenna Feeder Network for Space-Borne X-Band Synthetic Aperture Radar," IEEE Trans. Antennas and Propagation. vol. 66, no. 7, pp.3463~3474, Jul. 2018.
- [2]Budhaditya Pyne, Ryohei Naruse, Hirobumi Saito, Jiro Hirokawa, Vinay Ravindra, and Prilando Rizki Akbar, "Robust Contactless Noncircular Choke Flange for Wideband Waveguide Applications," IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, vol. 67, no. 3, pp. 861-867, Mar. 2019.
- [3]Jiro Hirokawa, Makoto Ando, and Naohisa Goto, "Waveguide-Fed Parallel Plate Slot Array Antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 40, no. 2, pp. 218-223, Feb. 1992.
- [4]Hideki Ueda, Jiro Hirokawa, Makoto Ando, Osamu Amano, and Yukio Kamata, "A Lightweight Radial Line Slot Antenna with Honeycomb Structure for Space Use," IEICE Transactions on Communication, vol. 91, no. 3, pp. 871-877, Mar. 2008.
- [5]Yohei Miura, Jiro Hirokawa, Makoto Ando, Yuzo Shibuya, and Goro Yoshida, "Double-Layer Full-Corporate-Fed Hollow-Waveguide Slot Array Antenna in the 60GHz-Band," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 59, no. 8, pp. 2844-2851, Aug. 2011.
- [6]Shuang Ji, Jiro Hirokawa, and Takashi Tomura, "A Wideband and High-Gain All-Metallic Perpendicular-Corporate-Fed Multi-Layered Parallel-Plate Slot Array Antenna," IEEE Access, vol. 10, pp. 38000-38011, Apr. 2022.

^{*7}小型(数十cm程度)平板状の衛星



工学院電気電子系 廣川研究室

廣川研究室には、2023年1月現在、廣川二郎教授、戸村崇助教、秘書1名、研究員2名、博士課程学生7名、修士課程学生11名、学部4年生3名がいます。「世界にない新しい構造の平面アンテナ」をキーワードとして研究を行っています。方形平行平板スロットアレーアンテナ以外の主な研究テーマをいくつか簡単に説明します。

<ポスト壁導波路>

図4のように金属膜付き誘電体基板に金属ポストを密に2列設けて構成した導波路で、Substrate Integrated WaveguideあるいはLaminate Waveguideとしても知られています。本研究室は世界で先導した機関の1つです。現在ではミリ波帯導波路の代表的な1つとして広く認知されています。

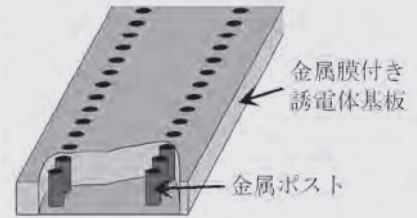


図4 ポスト壁導波路

<積層薄板拡散接合*8 並列給電スロットアレーアンテナ (図3参照)>

導波路パターンをエッチングした多数の金属薄板を積層し、真空中で加圧加温して電気的接合を得る導波管アンテナ製法です。金膜付きのシリコンウエハを用いて350GHz帯でも同様に製作できます。

<任意数のアンテナ直交ビームを形成するビーム切替回路>

従来のビーム数が 2^n に限られるバトラーマトリックス等と異なり、任意のビーム数を必要最小の回路層数で構成する回路を数値的に設計する手法を示しました。図5に、従来のバトラーマトリックスと提案マトリックスの構造図を示します。8ビームの場合、従来のバトラーマトリックスの場合は10レイヤであるのに対し、提案マトリックスでは8レイヤとなり短縮化が実現できています。

また、導波管2面結合器を提案し、2次元ビーム切替一体回路構成により、従来の水平面と垂直面で個別に切り替える回路を縦続した場合に比べ長さを半減できました。

*8複数の金属薄板を積層し真空中で加圧加温すると、金属の原子が拡散して接合する方式

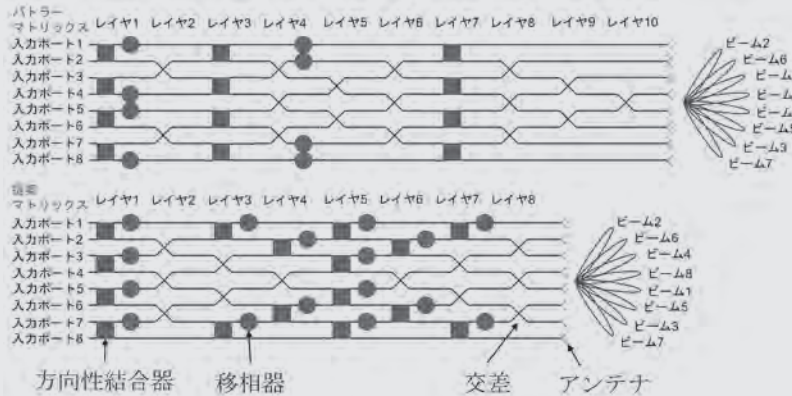


図5 提案マトリックスとバトラーマトリックス



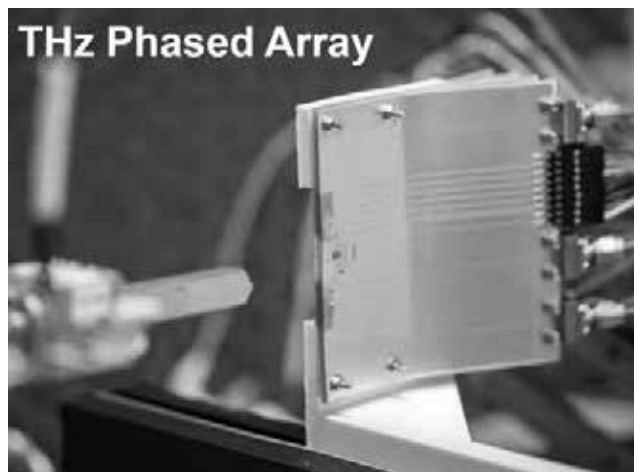
廣川研究室の集合写真 (2022年10月、筆者2列目中央)

次世代無線通信システムを支える 最新ミリ波・テラヘルツ波IC技術

～ CMOS 半導体回路技術で拓く未来 ～

Beyond 5G/6G から衛星通信まで、より高速・大容量、低消費電力で環境にやさしい次世代無線通信システムを実現するミリ波・テラヘルツ波 IC 技術開発の最前線を紹介する。

国立大学法人東京工業大学
工学院電気電子系 教授
岡田 健一



世界初 CMOS テラヘルツ帯フェーズドアレイ無線モジュール

はじめに

国内外で第5世代移動通信システム（5G）のサービスが開始され、史上初めてミリ波帯を用いる大規模商用サービスの利用が広がりを見せている。ミリ波帯無線通信の更なる高度化が必要とされる一方で、早くも5Gの先を見据えたBeyond 5G/6G無線通信に関する研究が活発に行われている。より高速・大容量な無線通信を実現するために、5Gにおけるミリ波帯よりもさらに10倍以上高い周波数帯であるテラヘルツ帯の利用までが検討されている。

一方で我々の子や孫、その先の世代の子供たちまで持続的に豊かで安心して生活できる地球環境を守ると同時に、経済や社会の成長を実現していくためには、通信速度や容量の向上だけではなく、地球に優しいグリーンな無線技術が必要である。

本稿では、このような次世代の無線通信システムを実現するための超高周波半導体集積回路（IC）技術に関する東京工業大学工学院電気電子系岡田研究室での研究開発成果を紹介する。

5G 向けミリ波フェーズドアレイ無線機

ミリ波帯は、これまで携帯電話等で利用されてきた周波数帯に比べて非常に広い周波数帯域幅が利用できるため、超高速大容量の通信が可能になると期待されている。5G用の周波数帯として、まずは28GHz帯や

39GHz帯の利用が開始しているが、さらに高い周波数の割当が合意されており、数百MHzから数GHzもの周波数帯域が利用できるようになる。

その一方で、ミリ波帯の電波は伝搬損失が従来のマイクロ波帯の約10倍以上大きいという問題があり、これを解決するために、複数のアンテナ素子を協調して動作させ、アンテナにおける電波の放射の指向性を高め、なおかつ、その放射方向を電気的に制御するアクティブフェーズドアレイアンテナ技術が盛んに研究されている。

フェーズドアレイ無線機はアンテナと同じ数のビームフォーマで構成され、多数のビームフォーマを通る信号の位相および振幅を制御することで、高い指向性を持たせている。このようなビームフォーミングの技術により、高速通信や通信距離の増大、さらには、不要な干渉の低減による空間的な通信容量の増大を可能にしている。

一方で、それぞれのアンテナ素子から出力される信号の位相や振幅強度の特性のわずかなばらつきは、このビームフォーミングの効果を著しく低減することになる。これを防ぐには、特性のばらつきをきわめて低く抑える必要があるが、ミリ波の帯域でこれを実用的な低コストで実施するにはいわゆる補償技術の確立が鍵となる。

当研究室ではミリ波トランシーバーのビームフォーミングに必要な信号の振幅や位相の検出・補償の

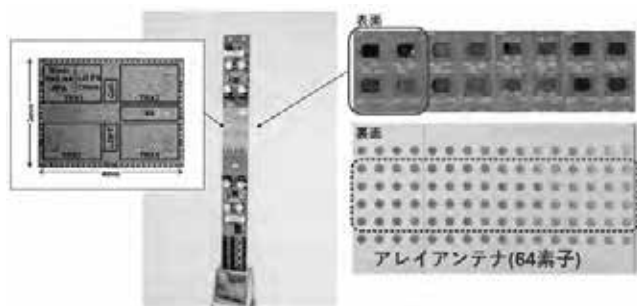


図1 5G向け39GHz帯フェーズドアレイ無線機

方式および回路を新たに提案し、トランシーバーの試作、実証に成功した [1]。4系統のフェーズドアレイ無線機を搭載した無線送受信チップを最小配線半ピッチ65nm（ナノメートル）のシリコンCMOSプロセスで試作した。図1左上部にチップ写真を示す。チップサイズは3mm×4mmである。本チップは、39GHz帯で15.5dBmの飽和出力電力を有する。

本チップを図1右部に示す評価基板に16チップ実装し、64素子のフェーズドアレイを構成した。実際に電波暗室内で、1mの距離を隔てて2台のモジュールを対向させ、開発した補償回路を動作させてデータ伝送試験を実施した結果、補償回路の実力は位相で0.08度、振幅で0.04dBと極めて優れた特性を示し、各アンテナの位相振幅を制御することにより、電波の放射方向を0.1度の精度で調整できた。消費電力は1チップあたり送信時1.5W、受信時0.5Wである。

偏波 MIMO 対応ミリ波フェーズドアレイ無線機

フェーズドアレイを用いて無線通信を高速化する技術としてMIMO (Multiple Input Multiple Output) がよく知られているが、ミリ波帯においては送受のアンテナ間に遮蔽物のない見通し通信を行う必要があるため、従来のマイクロ波帯のMIMO技術をそのまま適用することは難しい。そのため、ミリ波帯においては偏波を用いて見通し間でMIMO通信を実現する偏波MIMOの技術が注目されてきた。

偏波MIMOでは、一つのアンテナで水平と垂直の直交する二つの偏波信号を発生させる。しかしながら、単一のアンテナから異なる二つの信号を放射するために両者の分離が難しく、また集積回路チップ内やプリント基板上の配線でも信号が混信する可能性がある。特に周波数帯域幅が広がるほど混信を防ぐのが困難となる。従来の回路方式ではこのような混信による信号品質劣化から64QAM変調での偏波MIMO通信が限界であった。

もちろん別々のアンテナを用いれば、ミリ波帯でもMIMOを利用することができるが、省面積化の観点から、単一のアンテナでの偏波MIMOを実現できる技術の確立が望まれている。

当研究室では、従来の回路方式で問題となっていた偏波信号間の混信を無線機回路内で打ち消すことにより、信号品質を改善し、通信速度を向上させる新たな回路方式の開発に成功した [2]。具体的には、信号漏洩を検出する回路と、高精度補償を可能とするアクティブキャンセル回路を無線機内に内蔵することにより、偏波補償回路を実現した。

この新しい回路方式を用いたフェーズドアレイ無線機を、最小配線半ピッチ65nm（ナノメートル）のシリコンCMOSプロセスで製作した。チップ写真を図2に示す。水平偏波用に4系統分、垂直偏波用に4系統分のトランシーバーを4mm×4mmのチップに集積した。本チップをWLCSP (Wafer Level Chip Size Package) 技術によりパッケージングし、表面にアレイアンテナを設けたプリント基板の裏面に実装した。基板の写真を図3に示す。個々のアンテナ素子には、それぞれ水平・垂直の2偏波分の信号線が接続され、プリント基板全体では、合計64個のアンテナ素子と、16個の集積回路チップが実装されている。

電波暗室内でこのフェーズドアレイ無線モジュール2台を対向させ、開発した偏波補償回路を動作させて実際にデータ伝送試験を実施した。その結果、偏波補償回路の動作により、偏波間信号漏洩は-15dBから-41dBに改善されたことが明らかとなっ

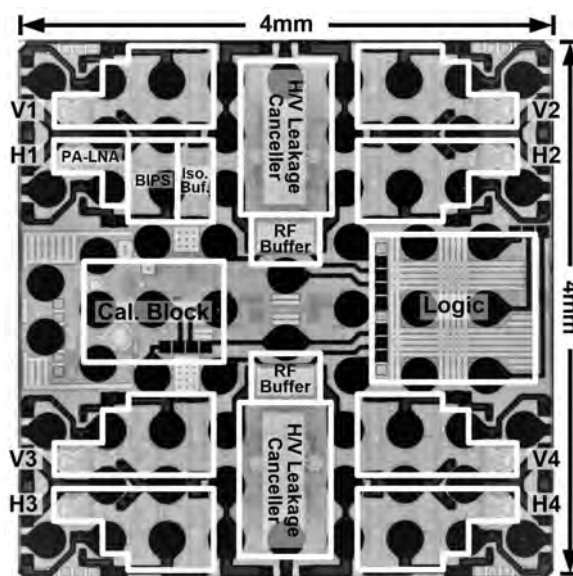


図2 偏波 MIMO 対応フェーズドアレイ無線機

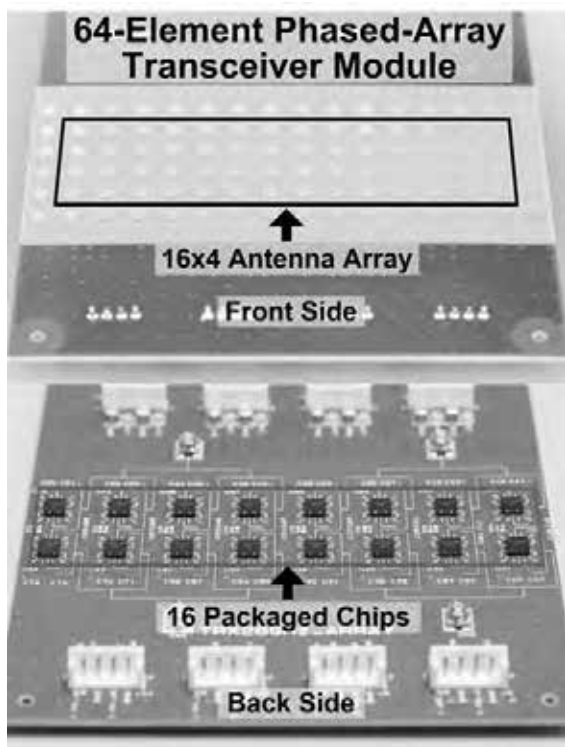


図3 64 アンテナ素子搭載プリント基板

た。従来技術では、偏波間の信号漏洩のため、28GHz帯に割り当てられている400MHz帯域幅を用いて256QAMの偏波MIMO通信を行うことができなかったが、今回開発した回路によって補償することで、256QAMによる偏波MIMOでの通信に世界で初めて成功した。

6G 向けテラヘルツ無線システム

6Gではさらなる通信速度向上のために、5Gにおけるミリ波帯よりも10倍以上高い周波数帯であるテラヘルツ帯を用いることが検討されているが、テラヘルツ帯では通信距離の確保がさらに難しくなる。通信に用いる搬送波周波数が高くなるほど、単一のアンテナによる通信可能な距離が周波数に反比例して短くなるためである。

そのため、ミリ波帯と同様フェーズドアレイ技術による通信距離の増大が期待されるが、フェーズドアレイでは周波数に比例して高密度にアンテナと送受信機を並べる必要があり、波長の短いテラヘルツ帯においては容易でない。個々のアンテナは半波長ピッチでアレイ状に配置する必要があるが、28GHz帯であれば5.4mm程度のピッチが300GHz帯では0.5mmとなり、非常に高密度な配置が要求される。そのため、テラヘ

ルツ帯ではこれまでアクティブフェーズドアレイ技術による通信機は実現されていなかった。

当研究室では、アンテナの配置方法の工夫と、新たに考案したCMOSフェーズドアレイICによる高密度化により、テラヘルツ帯でのフェーズドアレイ無線機を実現した [3]。具体的には双方向回路により、同じ回路を送信にも受信にも切り替えて利用できるようにして回路を半減、チップを小型化した。さらにサブハーモニック型のミキサにより、双方向動作を実現した。フェーズドアレイでは、送受信する信号の位相制御が必要であるが、テラヘルツ帯でも広帯域動作が可能なLO移相方式*1を用い、双方向増幅器を分布型とすることで広帯域化を図った。送受信機全体として38GHzの非常に広い変調帯域が実現できた。

このテラヘルツ帯でのフェーズドアレイ無線機ICも最小配線半ピッチ65nm(ナノメートル)のシリコンCMOSプロセスで製作した。チップ写真を図4に示す。チップサイズは1.70mm×2.45mmと小さい。

特殊な製造技術を利用せず、安価で量産を可能とするために、現状の5Gと同じくプリント基板の上にテラヘルツ帯フェーズドアレイを構成する方法を考案した(タイトルの図)。液晶ポリマー基板上の銅箔にアンテナパターンを形成し、薄化した図3のチップを実装したものを4層積層することでフェーズドアレイアンテナを構成した。ICに搭載した制御回路から移相器を操作し、アンテナ放射パターンを測定したところ、位相の設定値にあわせてビームステアリングできていることが確認できた。消費電力は送信時・受信時ともに0.75Wである。

本研究成果によりテラヘルツ帯でもアクティブ

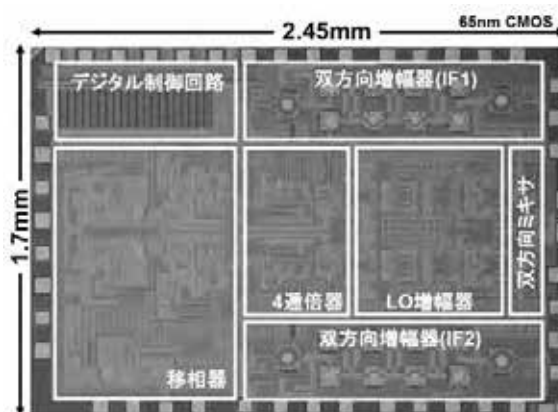


図4 テラヘルツフェーズドアレイ無線機のチップ写真

*1 搬送波となる局部発振器 (LO) の信号の位相を変化させる LO 移相器を用いた移相方式。今回この LO 移相器を 4 乗倍器に前置することで、線形な移相特性を実現した。

フェーズドアレイの利用が可能となった。アレイ数を増やすことにより通信距離を比例して伸ばすことができるので、テラヘルツ帯の無線通信で問題となっていた通信距離の問題が解決できる。これまでのテラヘルツ帯無線通信では指向性アンテナが用いられてきたが、今後はミリ波帯同様にアクティブフェーズドアレイによるものが主流になっていくと考えられる。

超小型衛星搭載向け無線機

当研究室では、東京工業大学白根篤史准教授と協力し、無線通信のカバレッジを現在よりもさらに拡張し、宇宙まで展開するための無線通信向け集積回路 [4] や、カーボンニュートラル時代を切り拓く無線電力伝送を利用した電源を必要としない無線機の研究も行っている。宇宙で大きく展開する膜面上でのフェーズドアレイ無線機 [4] や、無線電力伝送により電源不要で動作可能なミリ波帯5G中継無線機等の研究開発 [5] に成功している。

おわりに

次世代の無線通信システムを実現するための超高速周波半導体集積回路 (IC) 技術について紹介した。

特殊な材料や工法は使用せず、安価で大量生産が可能な CMOS 半導体技術と基板技術を用い、システム・高周波回路設計技術を駆使して今後期待の高まる Beyond 5G/6G や衛星通信実現にむけた様々な課題解決を目指している。通信速度や容量の向上のみに目を向けるのではなく、低消費電力化によるエネルギー効率向上や原材料消費等地球環境への影響にも十分考慮し、地球に優しいグリーンな無線機の進化に貢献していきたい。

<参考文献>

- [1] Yun Wang, et al., "A 39-GHz 64-Element Phased-Array Transceiver with Built-in Phase and Amplitude Calibration for Large-Array 5G NR in 65-nm CMOS," IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC), Vol. 55, No. 5, pp. 1249-1269, May 2020. IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC), Vol. 55, No. 5, pp. 1249-1269, May 2020.
- [2] Jian Pang, et al., "A 28-GHz CMOS Phased-Array Beamformer Utilizing Neutralized Bi-Directional Technique Supporting Dual-Polarized MIMO for 5G NR," IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC), Vol. 55, No. 9, pp. 2371-2386, Sept. 2020.
- [3] Ibrahim Abdo, et al., "A 300GHz-Band Phased-Array Transceiver Using Bi-Directional Outphasing and Hartley Architecture in 65nm CMOS," IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 316-317, Feb. 2021.
- [4] Dongwon You, et al., "A Ka-Band Dual Circularly Polarized CMOS Transmitter with Adaptive Scan Impedance Tuner and Active XPD Calibration Technique for Satellite Terminal," IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), pp.15-18, June 2023.
- [5] Michihiro Ide, et al., "A 28-GHz Phased-Array Relay Transceiver for 5G Network Using Vector-Summing Backscatter with 24-GHz Wireless Power and LO Transfer," IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC), Vol. 57, No. 4, pp. 1211-1223, Apr. 2022.



工学院電気電子系 岡田研究室

岡田研究室では、「RF・アナログ・デジタル混載集積回路設計」に関する研究開発を行っています。微細 CMOS を用いたアナログ・デジタル混載システムおよび超高速無線通信システムの可能性の追求に主眼を置き、回路からシステムまでの幅広い取り組みを通じて、世界最高性能を目指すとともに技術の体系化と実用化を図ります。



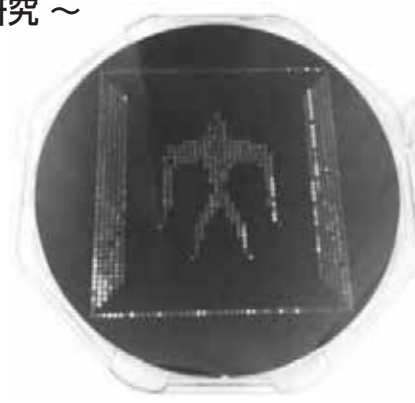
(2018年12月3日撮影 / 筆者前列中央)

次世代分散コンピューティング技術に向けた超広帯域光トランシーバ用光集積回路の研究開発

～ 2030年代の多様性のある社会に向けて。
いつでもどこでも「じぶん情報」収集を支える最新集積回路研究 ～

2030年代、個人のためにカスタマイズされたオンデマンドデータを、いつでもどこでも得られる時代が来る。

そのための分散コンピューティング技術実現に向けた超広帯域光トランシーバ用光集積回路技術研究の現状を概説する。



国立大学法人東京工業大学
工学院電気電子系 教授

技術研究組合光電子融合基盤研究所

異種材料集積デバイス・分散コンピューティング研究開発本部 本部長

西山 伸彦

光集積回路で利用される半導体異種材料集積技術で作った
東工大シンボルマーク

はじめに

今から10年後、2030年代の未来を想像してみたい。Society 5.0と言われ始めて久しいが、実際にサイバーとフィジカルが融合する生活が送れているだろうか？あらゆる身近な端末が、6G無線通信などを介してネットワークに繋がれ、情報をやり取りする。そして、AR、VR技術が手軽に利用でき実際には体験できないことも体験できる。そのような未来であろうか。そのような社会の実現で、何がうれしいのか考えたときに、筆者は、個人が必要な時に、どこでも、「自分用にカスタマイズ」された情報をオンデマンドでもらえ、利用でき、逆に発信できることだと考えている。ブロードキャストと同じ情報をオンデマンドで受け取るのではなく、個人の多様性に合わせることができ、皆が生きやすいと感じられる社会ということである。

さて、そのようなことが、今の技術でできるのかと言われれば、答えはNOである。光ファイバ有線通信、無線通信、そしてコンピューティングの処理速度のどれをとっても、理想のシステムスペックを実現するためには、まだ一段二段の研究開発が必要であり、世界中の大学を含む研究機関・企業がこれに取り組んでいる。特にコンピューティングは、もちろん個々のサーバの処理速度を上げることは重要であるが、それに伴いどうしても消費電力は上昇していく。それを束ねるデータセンタ（以下、DC）の消費電力も増大していき、将来的には大規模DCを建造すれば、その横に発電所を作らなければいけないといった話もある。これを解決するためには、DCを構成するデバイス、そしてネッ

トワークの低消費電力化を行うとともに、DCを地域に分散化することによる、エネルギー使用を平準化も必要となる。また、分散化は、よりユーザーに近いところにDCが配置されることになるため、ユーザーとDC間の遅延を低減することにも繋がる。しかしながら、大規模DCを分散化し、それらを繋いで一つの処理、いわゆる分散コンピューティングを行おうとすると別の問題が生じる。

ひとつは、接続ネットワークの遅延。一般的には最下層のレイヤーで10ミリ秒が基準とされる。また、それぞれのサーバリソースに対する適切なタスクの配置が間違えば「待ち」が発生する問題も存在する。これらをネットワークとトランシーバの両面から解決していくのが、我々の研究開発の目的であり、これを実現するために、我々、東工大のグループとともに、技術研究組合光電子融合基盤研究所（通称PETRA：プロジェクトの参加主要メンバーは、住友電工および富士通）、産総研、光産業技術振興協会、東大、慶応大、北大でチームを組み取り組んでおり、今後コンピューティングミドルウェアのメンバーも加わる予定である[1]。本稿では、プロジェクトの概要を述べた後、主に我々の研究室で行っている、光トランシーバ用光集積回路について述べていく。

次世代分散コンピューティングのための必要技術

図1には、プロジェクトの構成要素を図示している。ネットワークにおいては、「多方路エラスティックネッ

トワークアーキテクチャ」と呼んでいる構成をとっている。これは、各計算ノードのリソースを制御プレーンが監視し、余裕がある計算ノードにタスクを多く割り振り、余裕のないノードには、少なく割り振ることにより、待ち行列を最も短くする。そのような制御アルゴリズムを開発するとともに、トランシーバに対しても新たな性能を必要とする。このネットワークにおいて必要なのは、伝送帯域が可変可能な光トランシーバであり、我々が実現しようとしている光トランシーバは、波長別に基本データ粒度を割り当てることによって、それを可能とする。また、低い伝送レートでデータを送信しているときに、同じ消費電力であれば、電力効率が悪化するため、伝送レートに応じて電力も変化するようにする必要がある。トランシーバ全体の伝送帯域としては、現在の数十倍となる毎秒 10 テラビットを目標としている。

ただし、このような伝送速度を実現したときに、単に現状の毎秒 200 ギガビットトランシーバやその技術の延長を行っても、トランシーバ一個当たり kW レベルの消費電力となり、そもそも 100 W 以下でなければサーバ内で電力を供給できないので、実現不可能である。そのため、トランシーバの構成そのものを大きく変更すること、光素子の高性能化・集積化を進めることで、ドラスティックに消費電力を低減することが求められる。前者は、現時点のトランシーバは、デジタルシグナルプロセッサ (DSP) 電子回路に負荷をかけ、様々なネットワーク上の劣化を補償している。また、デジタル信号をアナログドライバで光素子に合わせた信号に変換をし、光素子を駆動している。これらによって電子回路において大きな消費電力を必要としているが、電子回路と光集積回路を一体設計することによって、電子回路の機能を光集積回路に譲り渡すことや、一部の機能を省略することが可能となる。例

えば、上述したデジタル信号で直接光集積回路上の光変調器を駆動することにより、アナログドライバを不要とすることが可能となる [2]。光集積回路の必要性については、次節で述べる。

異種材料集積技術と光回路

光集積回路は、電子集積回路と同じく、複数の素子が一つのチップに集積されている。ただし、一つ一つの素子の大きさが様々で、揃ってはおらず、屈折率も信号の波長を決める重要な要素のため、一般的には温度安定性の優れた場所に設置される必要がある (つまり温度制御器の上に導入する)。ここで、光集積回路化すると、従来個別に温度制御器の上に形成されていたものが、一つの温度制御器でよいため、大幅に消費電力が下がる。また、光の結合損失も低減されるため、そもそも必要なエネルギーが低減される上、アセンブリのコストも不要となる。

光集積回路のコンセプト自体は、1960 年代から提案されていたが [3]、技術的な問題や、それほど実現要求が強くなかったこともあり、しばらくは大きな進捗はなかった。しかしながら、その必要性とともに、電子回路と同じくシリコン基板上 (実際は SOI (Silicon-on-Insulator) 基板) に大規模な光集積回路を形成可能な「シリコンフォトニクス」と呼ばれる技術の出現により、大きく様相が変わり、一部ではすでに実用化されている。ただし、このシリコンフォトニクスは問題がある。レーザや光増幅器のコアとなる光利得を持ちうる材料が形成できないのである。これは、シリコンが本質的に間接遷移半導体という発光しにくい材料であることに起因する。もちろんこれを解決するための研究もおこなわれているが、より実用化の近い方法として、直接遷移半導体である III-V 族化合物半導体をシリコン上に形成することである。シリコンと III-V 族半導体は、大きく結晶の性質 (結晶格子の大きさ) が異なるため、直接的に結晶成長は困難であり、異種材料直接接合という新たな方法を用いる必要がある。

異種材料直接接合は、その名の通り、異なる材料を、糊剤を利用せず直接接合する方法である。主に二つの方法があり、一つは、半導体表面を親水化する (表面において水がはじかない状態) ことにより、水分子を介した弱い結合を形成しておき、その後、高温にさらすことによって水を脱離させ、残った酸素を介した強固な結合を作る方法である。もう一つは、高真空状態において、プラズマや原子ビームを照射し、表面の結

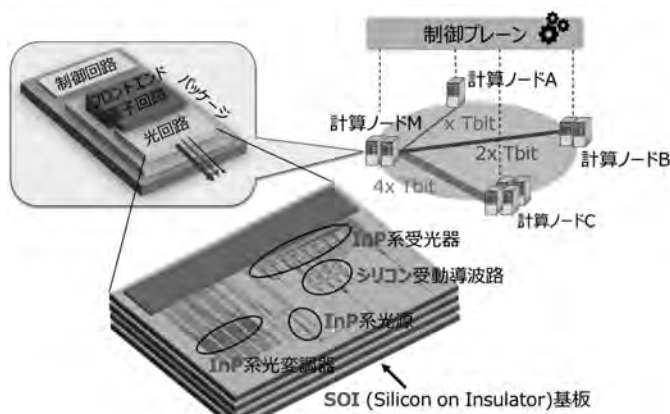


図1 プロジェクト概要



図2 ハイブリッド基板接合界面の電子顕微鏡写真 [4]
光集積回路内素子の特性例

合手をむき出しにし、エネルギー活性な状態にして、他の基板を接合する方法である。これによって原子は安定を求めるため、お互いに結合することになる。筆者の研究室は両方の技術を有し、材料やアプリケーションによって使い分けている。図2には、接合した半導体の接合界面電子顕微鏡写真を示す [4]。このように、薄いアモルファス層（結晶のように原子が秩序よく並んでおらず配列されている状態）を介して、接合されていることがわかる。本稿冒頭の写真にもこのような技術を利用して本学のロゴを形成した写真を示しているが、このように自在に接合が可能である。一般的な結晶成長と異なり、二つの基板で結晶の格子が大きく違っても、歪は蓄積しないことが確認されている。接合後、III-V族半導体側の基板を取り除いてしまえば、見た目は全く通常の半導体基板と変わらないハイブリッド基板が完成する。これを加工していけば、シリコン基板上にすべての光素子要素が形成可能となる。

このようなハイブリッド基板によって、III-V族半導体による光利得の生成と、シリコンによる高精度な加工精度を利用した均一大規模導波路が可能となり、光機能回路で必要となる光源、受光器、増幅器、フィルタ等能動素子のすべてがワンチップ上に形成可能となる。利得素子が必要な部分だけIII-V族半導体を残し、その他はシリコン導波路のみとしている。プロセス自身は、上述素子を一括して作製を行うが、光学的には大きく異なる場合もあるので、その場合の光結合を設計に取り入れる必要がある。図3には、III-V族半導体とシリコンが接合されたハイブリッド領域との結

合部の電子顕微鏡写真を示す [5]。このように、徐々に幅が変わっていくテーパ構造を導入し、断熱的に光の導波路内電界形状を変形していくことにより、接続面での反射や散乱を抑制し、高効率な結合を実現している。2段階のテーパ構造を利用し、結合効率の波長依存性や効率を向上していることが特長である。図4には、この構造を利用して作製した、波長可変レーザの波長可変特性を示している [6]。波長可変レーザは、光利得を有するハイブリッド部の前後に、シリコン導波路によるリング共振器や、ループミラーと呼ばれるループして光が戻ること高い反射率を持つミラー構造を有している。リング共振器は、前後で微妙に異なるリング半径を有し、異なる波長間隔でフィルタ特性を示す（透過特性は、リング円周長に反比例する）。そのリング共振器の上部にマイクロヒーター（薄い金属配線）を付け、電流を流すと発熱し、屈折率が変わる＝フィルタ波長が変わる。二つのリングのフィルタ波長が一致するところ（バーニア効果：ノギスを想像していただければいい）で強いフィルタ効果を示すので、そこで発振する。また、広い波長掃引が可能

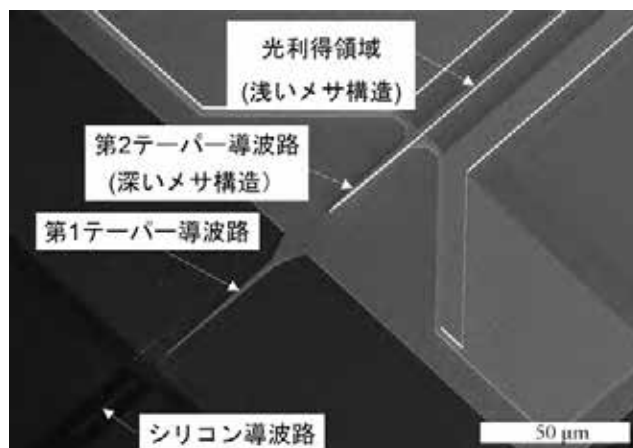


図3 ハイブリッド素子テーパ部の電子顕微鏡写真 [5]

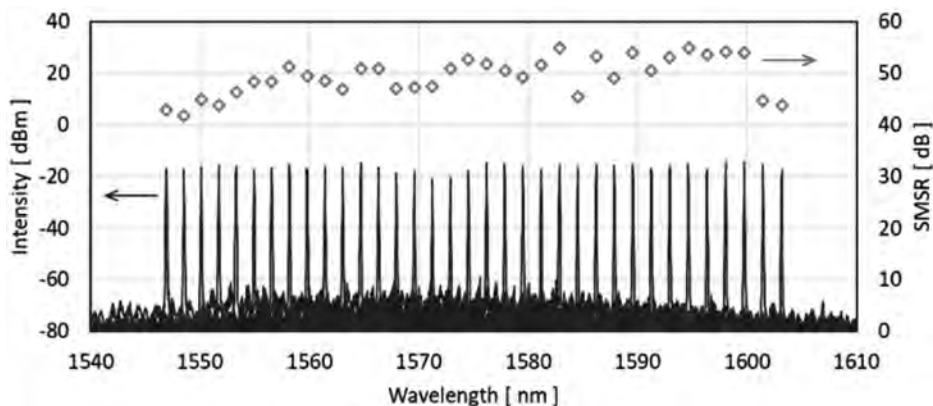


図4 ハイブリッド波長可変レーザのスペクトル [6]

となる。これにより 50nm 以上の波長可変帯域で、主発振波長に対して他の波長の強度が 1/10000 以下という純度の高い光源が実用可能である。これは一例であるが、この組み合わせを変えることで、多様な機能をワンチップで実現できる。実際に筆者らは、ワンチップ上にこのような波長可変レーザとともに、光増幅器や光受光器などを一括集積した集積回路を作製している。このような方法で作製された素子に対して信頼性に関する疑問を聞かれることもあるが、現在共同研究先企業で調査が行われ、良好な特性が得られている。今回は、III-V 族半導体とシリコンの異種材料接合について述べたが、同様の接合方法によって、ガーネット基板を接合することによって、光が一方向にしか進まない光アイソレータも同じく東工大の庄司研究室で実現されており、今後も様々な材料への本技術の利用が予想される。

まとめ

本稿では、次世代分散コンピューティング技術に向けた超広帯域光トランシーバ用光集積回路の研究開発について、その一部を述べた。本稿では深く述べなかつ

たが、前述したトランシーバアーキテクチャ、ネットワークアーキテクチャについても多くの新たな知見が得られ始めており、超広帯域光トランシーバの実現が近づいている。

今回紹介した接合技術や光集積回路技術は、LiDAR 用光集積回路など、様々なアプリケーションに適用可能であり、今後も幅広く用いられ、人々の生活を豊かにしていくものと期待している。

謝辞

本研究で紹介した成果の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（JPNP16007）の支援を得た。

<参考文献>

- [1] <http://www.petra-jp.org/outline.html>
- [2] Y. Sobu, G. Huang, T. Mori, Y. Tsunoda, T. Yamamoto, S. Tanaka, and T. Hoshida: OFC2022, M1D.4 (2022).
- [3] S. E. Miller: J. Bell Syst. Tech. 48, 2059 (1969).
- [4] J. Lee, Y. Maeda, Y. Atsumi, Y. Takino, N. Nishiyama and S. Arai: Jpn. J. of Appl. Phys., 51, 042201, (2012).
- [5] T. Kikuchi, T. Hiratani, N. Fujiwara, N. Inoue, T. Nitta, M. Eissa, T. Mitarai, Y. Wang, Y. Oiso, N. Nishiyama, and H. Yagi: Jpn. J. of Appl. Phys., 61, 052002, (2022).
- [6] T. Hiratani, N. Fujiwara, T. Kikuchi, N. Inoue, T. Ishikawa, T. Nitta, M. Eissa, Y. Oiso, N. Nishiyama, and H. Yagi: 2021 Int. Semiconductor. Laser Conf., MP2.1 (2021).



工学院電気電子系 西山研究室

西山研究室は、東京工業大学大岡山キャンパスに位置し、光エレクトロニクスに関する多くの研究を行っている。微細加工技術と異種材料集積技術をコア技術に、半導体レーザや光集積回路を結晶成長からアプリケーション測定まで一貫通貫で研究できることが特長である。研究室としてのライフワークは、「異種材料集積と異種機能集積」を軸に、光・電波・電子のシームレスな融合と、究極の半導体レーザの実現である。これの元に、今回紹介した光集積回路だけではなく、LSI 上光インターコネクション回路、光ニューラルネットワーク、光集積量子センサなど、多くの研究を行っている。また、大学の役割として「研究者の楽園をつくる」をモットーに、共同研究などを積極的に受け入れ、企業研究者を含め、やりたいことができる環境を心がけている。施設としては、文部科学省マテリアル先端リサーチインフラの拠点の一つとして主にクリーンルーム設備共用化を行っており、他大学、企業ユーザも使用可能であるので興味がある方はコンタクトしていただきたい。(http://www.pe.titech.ac.jp/qnrc/nano_support/index-j.html)



研究室集合写真（2022年夏撮影）。筆者は2列目真中

東工大スマートモビリティ研究教育フィールドを活用した自動運転を支える通信技術の研究開発

東京工業大学大岡山キャンパスで展開されているスマートモビリティ教育研究フィールドを紹介する。本フィールドでは、学生を含む共同研究チームが、自動運転を支える最先端技術のイノベーションを目指して研究を行っている。

国立大学法人東京工業大学
超スマート社会卓越教育院 特任准教授
Yu Tao
超スマート社会推進コンソーシアム事務局 工学院特任教授
福田 英輔
超スマート社会卓越教育院 教授
阪口 啓



実験中に東工大大岡山キャンパス内を走行している自動運転車の様子

自動運転を支える無線通信

自動運転は近年急速に発展している分野である。特に機械学習、センサー、無線通信、高精度3D地図などの技術の進歩により、自動車が人間の介入なしに複雑な運転タスクを実行することが可能になった。自動運転開発の主な原動力のひとつは、交通安全の向上が期待できることである。交通事故はヒューマンエラーが大きな原因となっているが、自動運転システムは、ドライバーの要因によって引き起こされる事故の数を大幅に減らすことができる。また、より効率的で便利な交通手段への要求が高まっていることも重要な要因である。自動運転車は、交通の流れを大きく改善し、渋滞を緩和する可能性があるほか、高齢者や障害者など運転ができない人たちにも移動の選択肢を提供することができる。しかし、自動運転の信頼性と安全性を確保するために、センシングシステムを1台の自動運転車から複数のコネクテッドカーや路側機に拡張することによる協調的知覚や、高精度ダイナミック3Dマップのリアルタイム配信などの技術課題もある。

無線通信も近年急速な発展を遂げている分野であり、特に5G技術の開発によって大きな進展があった。5G（第5世代移動通信システム）は、従来の無線技術と比較して、高速・低遅延・大容量通信を実現する。そのため、車両とインフラと、車両と車両などのリアルタイム通信が必要な自動運転に適している。自動運転の主な課題の一つは、自動運転車が環境を確実に正確に把握することである。5Gなどの無線通信は、

車両と環境との間でリアルタイムにデータを交換するための高速かつ低遅延の接続性を提供することで、この問題の解決にも貢献する。例えば、5G技術を搭載した車両は、道路標識や信号機からリアルタイムの更新情報を受け取ることができ、情報に基づいた判断を行い、道路状況の変化により迅速に対応できるようになる。車両と環境との通信をサポートするだけでなく、無線通信は、車両とインフラ側の路側機、交通管理センター、緊急サービスなどの他の機器やシステムとの通信を可能にするV2X（Vehicle-to-Everything）通信の発展もサポートすることが可能である。これは、交通の流れや安全性の向上に役立つだけでなく、自動運転車の性能をさらに向上させるために使用できる貴重なデータを提供することができる。

東工大スマートモビリティ教育研究フィールド

東京工業大学超スマート社会卓越教育院は、完全自動運転の実現を支える無線通信の研究、自動運転を活用するスマートモビリティサービスの創造、およびそれをリードする人材の育成を推進するため、東京工業大学大岡山キャンパス内に「スマートモビリティ教育研究フィールド」を構築した。その全体構成を図1に示す。本フィールドにおいて、学生を含む共同研究チームが、自動運転を支える無線通信技術を含む最先端技術のイノベーションを目指して研究を行っている。フィールド内には、以下のものが用意されている。



図1 東工大スマートモビリティ教育研究フィールド

無線通信インフラ：

本フィールドに構築したV2X通信システムは、従来の低い周波数帯の760MHz帯DSRC (Dedicated Short Range Communication)、及び5.6GHz/2.4GHz帯無線LANだけでなく、60GHz帯のIEEE802.11ad (bd)を採用したミリ波V2Xが導入されている。特にミリ波V2Xを用いることで超高速・低遅延の狭域通信が可能になり、リアルタイムな協調認知などが実現できる。また、キャンパス内にはSDVN (Software Defined Vehicular Network) のオーケストレータが導入されており、どのセンサデータをどのV2Xを介してどの車両に伝送するかを制御することが可能になっている。

自動運転車両：

本フィールドにおいて用意されている2台の自動運転車両は、自己位置推定・地図構築 (SLAM: Simultaneous Localization and Mapping) のための複数台のLiDAR (Light Detection & Ranging) と、車線や標識や車両周りの環境を認識するカメラなどのセンサが設置されている。自動運転の制御には、ロボットオペレーティングシステム (ROS: Robot

Operating System) およびAutowareを用いている。また、自動運転及びデジタルツインに用いられる大岡山キャンパスのPC (Point Cloud) マップ、ベクトルマップ、高精細3Dモデルが用意されている。

路側機：

次世代高度道路交通システム (ITS: Intelligent Transportation System) に提供する路側帯 (RSU: Road Side Unit) はキャンパス内に4台設置されており、超高精細なLiDARと夜間の監視も可能なカメラ、V2X通信システム、および小型GPUサーバが設置されている。RSUは、キャンパス内の交差点に設置されており、LiDARとカメラのデータおよび物体認識の結果をV2Xを介して自動運転車両の車載器 (OBU: On-board Unit) に低遅延で伝送することにより交差点の安全性を高めることができる。

スマートモビリティ教育研究フィールドを活用した自動運転を支える無線通信の研究

スマートモビリティ教育研究フィールドを活用した自動運転を支える無線通信の研究開発の例を紹介する。

①車間干渉に対して ZigZag アンテナ配置による高い通信速度（1Gbps 以上）を実現



図2 ZigZag アンテナ配置

本フィールドでは、60GHz 帯のミリ波 V2X 通信に関する研究開発や実証実験が行われてきた。ミリ波帯を用いることで1Gbps を超える超高速低遅延通信が可能になるが、一方で遮蔽によるブロッキングが大きな課題になる。しかし V2X 通信では、車両間での中継通信を導入することで、このデメリットをメリットに変えることができる。ミリ波は遮蔽され易い、すなわち遮蔽している車両の後ろ側に回り込まないため、前方車両または路側帯と自車両、そして自車と後続車両間で同一のミリ波チャネルを用いて同時に通信することができる。実際に図2に示す様に本フィールドにおいて実験を行なったところ、複数車両間で同一のミリ波チャネルを用いて同時に通信を行なったとしても1Gbps を超えるスループットを全ての車両間で実現できることが明らかになっている。

②デジタルツインで最適な自動運転車のカーシェアリングを実現

本フィールドでは、将来のスマートモビリティサービスの研究開発も行われている。そのために重要な役割を果たすのがデジタルツイン (DT: Digital Twin) である。DT は、現実空間の状況を仮想空間に再現し、仮想空間上で解析及び未来を予測することで、現実空間の全体最適化を実現する技術である。このDTにより、複数台の自動運転車両を用いた公共交通システムやフリーフローティング方式のカーシェアリング及び物流などにおける最適配送システムが実現される。本フィールドには、DTの機能を検証するための小型の移動ロボットを用いた屋内の実証フィールドも用意されている。実際に図3に示す屋内検証フィールドで実験を行なったところ、3台の自動運転移動ロボットを

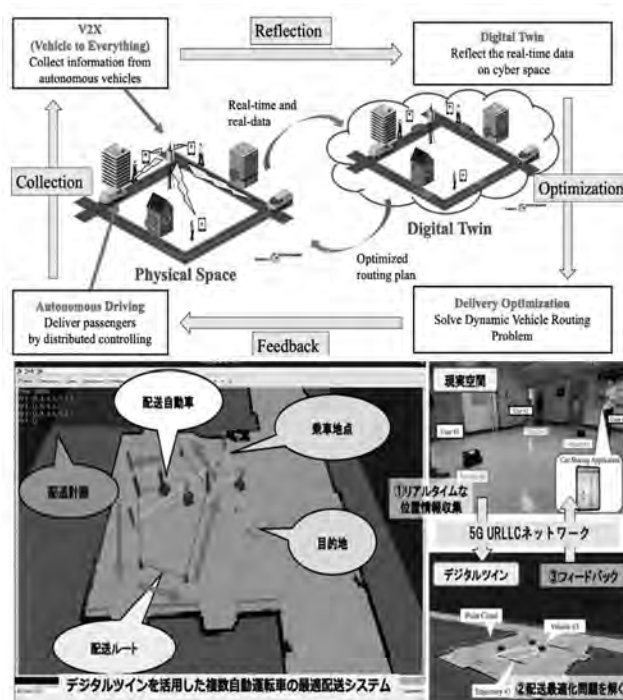


図3 ミリ波 V2X 通信による死角画像情報を車へ提供

用いたフリーフローティング方式のカーシェアリングサービスは、従来のシングルデポ方式のカーシェアリングに比べて配送効率を2倍以上に改善することが明らかになっている。

③ミリ波 V2X による HD 映像と LiDAR 点群共有で安全な自動運転のための協調認識を実現

本フィールドでは、路側帯に設置された LiDAR やカメラのデータを、ミリ波 V2X を介してリアルタイ

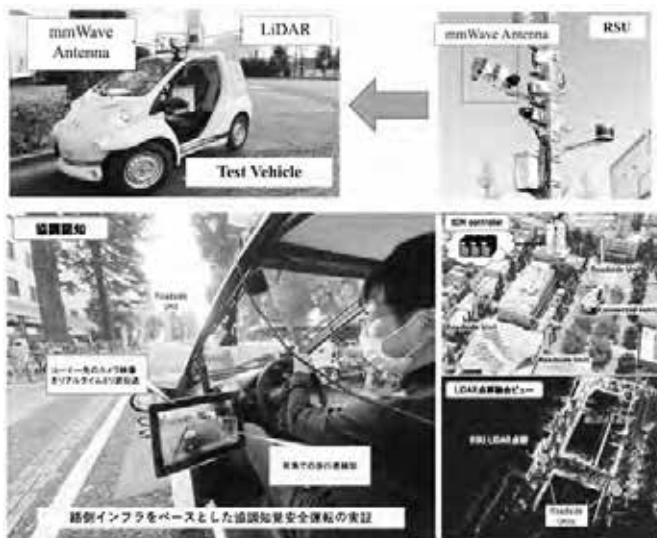


図4 ミリ波 V2X 通信による死角画像情報を車へ提供

ムに自動運転車両に伝送する協調認知の実証実験を行っている。また複数の路側帯間をミリ波 V2X を用いて接続することで、路側帯を介した中継通信も実現できる環境が構築されている。さらに SDVN オーケストラを用いることで、ミリ波中継通信の経路をリアルタイムに制御することができる。実際に図 4 に示す様に本フィールドで実験を行なったところ、自動運転車の走行ルート上の複数の路側帯の点群データをリアルタイムに収集し、3D マップにフュージョンできていることが分かる。

④ ユーザーインターフェースとして AR グラスを用いた死角透視

協調認知技術は、AR グラスを活用することで、未来の自動運転車だけでなく、現在の人々が運転する車や自転車および歩行者の安全性向上にも役立つ。すなわち、路側帯のカメラのデータをリアルタイムに AR グラスに伝送し、座標を合わせて重畳することで死角透視が可能になる。自転車や歩行者の場合は、小型軽

量な AR グラスが開発されることが前提になるが、自動車の場合はフロントガラスに重畳することもできる。本フィールドでは、路側帯に設置された LiDAR とカメラのデータを、ミリ波 V2X を介してリアルタイムに自動車に伝送し、点群データの位置にカメラの色情報を貼り付け、レンダリングの後に AR グラスに重畳する実証実験を行っている。実際に図 5 に示す様に本フィールドで実験を行なったところ、建物の裏側にいる歩行者を透視できていることが分かる。

まとめ

東工大大岡山キャンパスに構築されたスマートモビリティ教育研究フィールドと、それを活用した自動運転を支える無線通信に関する研究の例を紹介した。本フィールドでは、次世代 ITS を構築し、圧倒的に安全で飛躍的に効率の高い社会の創造に取り組んでいることをご理解頂けたものと考えている。

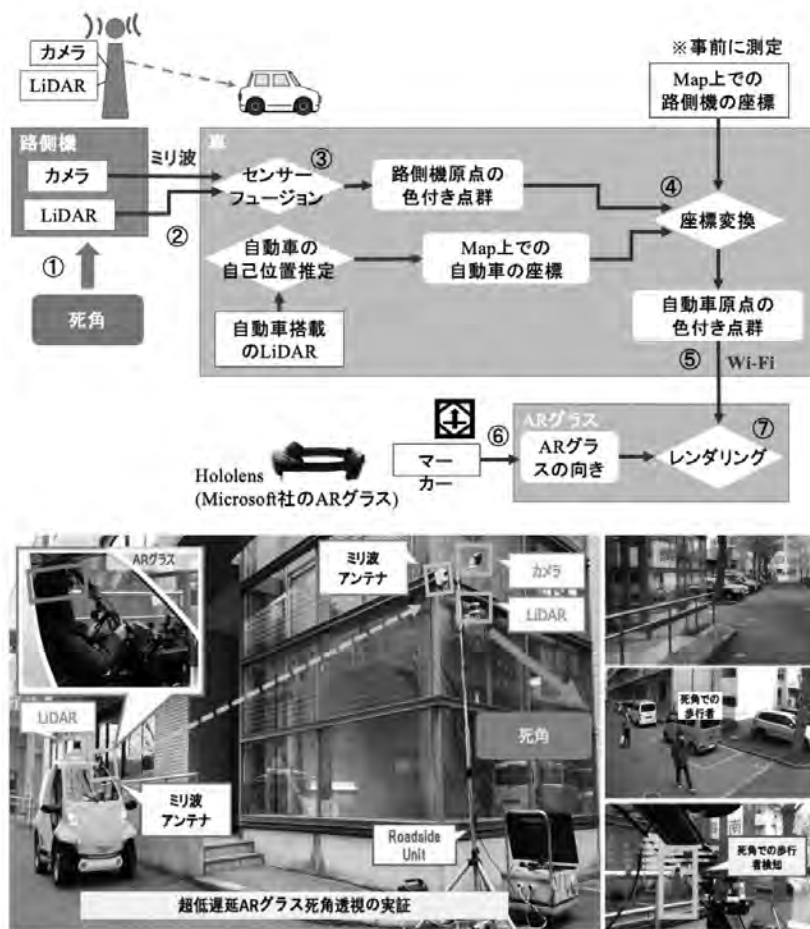


図 5 AR グラスを用いた死角透視

駿河湾スマートオーシャン計画と通信インフラ

海洋が抱える様々な課題をサイバー・フィジカルの高度な連携で解決し、超スマートなオーシャンの実現を目指す活動を紹介します。



葛飾北斎 東海道江尻田子の浦略圖

国立大学法人東京工業大学
超スマート社会卓越教育院 特任専門員 渡邊 文夫
超スマート社会卓越教育院 教授 阪口 啓

超スマート社会

平成 28 年 1 月に閣議決定された科学技術基本計画 [1] では、未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組として、世界に先駆けた「超スマート社会 (Society 5.0)」の実現が提言された。工業社会 (Society 3.0)、情報社会 (Society 4.0) に続き、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立させる人間中心の社会を目指している。

東京工業大学では、民間企業、政府系団体、アカデミアなど多様な職種・業種が連携して超スマート社会を実現していくことを目的として、超スマート社会推進コンソーシアム (SSS コンソーシアム) を 2018 年に立ち上げた [2]。さらに、サイバー・フィジカルの統合に加え、量子科学や人工知能などの最先端の科学技術を融合できる知のプロフェッショナルを育成することを目的として、文部科学省の卓越大学院プログラムとして、超スマート社会卓越教育プログラムを 2020 年に設立した。教育研究フィールドとして、オープンなイノベーションプラットフォームを図 1 に示すような 7 つの分野で構築して、学内外が連携した活動を推進している。

本稿では、Society 5.0 の新たな分野として海洋のスマート化に向けた活動を概観する。



図 1 超スマート社会教育研究フィールド - オープンイノベーションプラットフォーム -

海洋を取り巻く社会課題

持続可能な開発目標 SDGs では、目標 14 として「海の豊かさを守ろう」が掲げられている。そのターゲットには、海洋が抱える課題が明記されている。海洋ごみや富栄養化など海洋汚染、生態系の管理や保護、海洋酸性化、水産資源の科学的管理、沿岸域の保全、魚の乱獲、養殖や観光など海洋資源の持続的利用など多岐にわたる。

2021 年 10 月に国がまとめた「デジタル田園都市国家総合戦略」では、デジタル基盤の整備、デジタル人材の育成・確保、誰一人取り残されないための取り組みを通じて、地方の様々な社会課題解決を目指した戦略を示している [3]。地方都市や中山間地域を典型モデルとして重点的取り組みが開始されているが、「全国どこでも誰もが便利で快適に暮らせる社会」と言う目標とビジョンは、海洋・海岸・港湾と言った領域でも共通するものであり、「海洋版デジタル田園都市」は海に囲まれた日本では今後ハイライトされていくべき分野と言える。

海洋に関連する社会課題は、表 1 に例示するように多岐にわたる。これらの課題は相互に密接に関係し

表 1 海洋に関連する社会課題の例

海洋環境	海洋汚染	漁業・水産業・海業	漁業のスマート化
	マイクロプラスチック		水産業のイノベーション
	海水温上昇		高価値水産・食品
	海洋酸性化	海上交通・物流・エネルギー	自動航行
	ブルーカーボン		脱炭素化
	ブルーリカバリー		資源/物流/消費のDX
	海面上昇		洋上発電
海洋資源	ブルーエコノミー	労働環境	
	資源探査・事業化	船員不足・漁業人口	
	水産資源枯渇	労働安全・労働環境	
	生態変化・不漁	遠隔・海洋医療	
	持続可能漁業	港湾	
	海洋遺伝資源		港湾の脱炭素化
防災・安全			イノベーション・産業創出
	地震観測・気象観測		観光・レジャー
	航行安全・港湾安全	安全保障	

ている。課題を賢く解決して、持続的であり人間らしい生活環境と経済性の高い産業を創出していくことがスマートオーシャンであると言える。

駿河湾スマートオーシャン構想

デジタル田園都市構想 [3] を海洋にまで拡張する検討を推進すべく、駿河湾スマートオーシャン議員連盟が2022年1月に設立された [4]。清水港（静岡県）を中核に駿河湾・遠州灘一帯へ世界から人・情報・科学技術を集め、国際的な海洋研究・教育文化拠点を創出することを目的としている。

駿河湾は、2,500mの深海まである日本一深い湾であり、60kmほどの範囲に表層水、黒潮系・亜寒帯系・太平洋系海洋深層水と言う多様な海水が存在している。生物の多様性は勿論のこと、食品や医薬品など産業利用にも活用される恵み深い湾である。年間25億トンもの富士山の降雪雨により、大量の地下水が地表や海底に湧き出ていることも特徴である。

マグロの水揚げやオートバイやプラモデルの輸出量が日本一である清水港が駿河湾の産業と物流の中心的拠点となっている。さらに、葛飾北斎の富嶽三十六景のなかの「東海道江尻田子の浦略圖」を引用するまでもなく、世界文化遺産にも登録された富士山や三保の松原など素晴らしい観光資源を有している。

これらの特徴的な要素が多くある駿河湾は、海そのもののスマート化と港湾都市機能とサービスを効率化・高度化して快適性や利便性を生み出す新たな価値創造を目指す「スマートオーシャン」のモデル地域として好適と言える。そのような背景から、2022年4月に第1回スルガベイススマートオーシャン・シンポジウム [5] が開催されるなど、プロジェクトの具体化に向けて検討が進められている。SSSコンソーシアムは2021年6月からスマートオーシャンに向けた教育研究フィールドを立ち上げるべく準備を進めていたこともあり、地元と連携して推進主体となった。

駿河湾の多様なアセットを考慮すると、スマートオーシャンに向けて様々な活動が期待される（表2）。駿河湾と言う好適なモデル地域で様々なアクションプランが今後実施されていくことが

表2 駿河湾のスマートオーシャン構想

分野	アセット	アクション例
科学・技術 (海を知る)	船舶・海洋関連大学 ICT・DX関連大学 観測船ちゅうりゅう母港 水産海洋技術研究所 水産技術研究所 国産水産資源研究所	自動運転船開発実証 無人潜水機 (ROV) 開発実証 観測船ちゅうりゅう母港 データ連携テストベッド 北極域研究船 大学・企業との連携
産業・経済 (海を活かす)	港湾事業 物流拠点 養殖・水産業・市場 食品業・医薬品製造 高層建築 水素インフラ・バイオ産業	船客乗化 無人船・水素船 スマート漁業 インバウンド投資 イノベーション創出
環境・防災 (海と人を守る)	駿河湾生態系 深海から山までの多様性 南海トラフ	地震・津波・台風・噴火対策 気候変動対策 グリーン化 観測データの積極的活用
観光・文化 (海を楽しむ)	景観・温泉 食文化 サイバーク 世界文化遺産 マリンスポーツ	観光と研究の融合 海外の海洋研究都市連携 滞在型研究施設 ブルーツーリズム
教育・啓発 (海で育てる)	大学 練習船 水族館・博物館 自然体験サイト	オープンキャンパス リマースクール・インターン 教材開発 メディア発信

期待される。これらのアクションは相互に密接に関係しあうので、有機的連携を図りシームレスに社会実装することがスマートオーシャンの目指す姿と言える。

海は地球規模で連続的に繋がっており、地球規模の環境変化の影響を受ける。また、変化が激しく観測しにくいこともあり、生態系や海中などまだまだ謎の多い世界である。様々なデータを収集しデジタル的に集約することがまずは重要になる。生物データ、物理的データ、化学データ、人的データなどを多角的に集め、一体化して分析することで、新たな発見と価値創造が期待される。

またシームレスなスマート化のためには、海に対するデータプラットフォーム、通信プラットフォーム、AIプラットフォーム、エネルギープラットフォーム、ロボットプラットフォームなど様々な基盤の整備と充実が必須である。次章ではこの中の通信プラットフォームにフォーカスして紹介する。

スマートオーシャンの土台となる通信インフラ

海のスマート化の基盤となる通信インフラとしては、用途に応じて様々なサービス・システム・技術を活用していく必要がある。それらを概観して表3に示す。

表3 代表的な無線システムと海上利用

カテゴリ	システム	技術	サービス 製品	主な用途				駿河湾海上利用	
				電話	高速 データ	低速 データ	IoT		遠隔 通信
公衆 電気 通信	携帯電話	4G LTE	商用	✓	✓	✓	✓	概ね可能	
		5G	商用	✓	✓	✓	✓	基地局展開次第	
		B5G	未実	✓	✓	✓	✓	未実	
		6G	未実	✓	✓	✓	✓	未実	
	LPWA	LTE-M	商用				✓	概ね可能	
		NB-IoT	商用				✓	基地局展開次第	
	静止衛星	INMARSAT	商用	✓		✓		✓	可能
		JSAT	商用	✓	✓				可能
		N-Star	商用	✓		✓			可能
	低軌道衛星	Globalstar	商用	✓		✓			可能
イリジウム		商用	✓		✓			可能	
Starlink		商用		✓				可能	
OneWeb		近未来		✓				近未来	
Space Mobile Blue Origin		未実 ?	✓ ?	✓ ?				? ?	
HAPS/ハイパー ドローン	4G/5G	近未来	✓	✓				近未来、GW局次第	
低軌道衛星IoT	Orbcomm	商用				✓		可能	
	SpaceX SWAM	未実				✓		未実	
地自 域営 運通 信信	携帯電話	プライベート4G	実用		✓			基地局展開次第	
		ローカル5G	実用		✓	✓		基地局展開次第	
		ローカルB5G	未実		✓	✓		未実	
		ローカル6G	未実		✓	✓		未実	
	Wi-Fi	Wi-Fi	実用		✓				観測局展開次第
		LoRaWAN	実用				✓		基地局展開次第
LPWA	Sigfox	実用				✓		基地局展開次第	
	Wi-Fi HaLow	近未来				✓		観測局展開次第	
公共通信	VDES	地上VDES	実用			✓	✓	基地局展開次第	
		衛星VDES	未実			✓	✓	未実	

LPWA: Low Power Wide Area
HAPS: High Altitude Platform System
VDES: VHF Data Exchange System

商用	商用サービスが提供されている
実用	一般的な製品が手に入る
近未来	近い将来の商用化あるいは製品化の可能性がある
未実	商用サービスや製品化にはまだ時間がかかる

① 4G/5G/B5G/6G

最も基本となるのは、携帯電話サービスである。第4世代LTEは、沿岸を含め駿河湾内をほぼカバーしている。沿岸の多数の基地局からの電波が遠方飛来で重畳して到達するので、通信品質は陸上に比べると変動や劣化が起きやすい。各通信キャリアは、5Gサービスを全国に順次エリア拡大しているが、海上はまだほとんどエリア化されていない。28GHz帯、4.5GHz帯、3.7GHz帯など高い周波数帯を使用するため、伝搬距離は一般的に短く、沿岸の基地局から湾内へのサービス提供は容易ではない。将来的には、4G-LTEの周波数も順次5G化されていくので、海上エリアも現在の4G相当になっていくであろうが、システムのマイグレーションには10年程度のスパンを要する。

5Gの次の世代として、Beyond 5Gや6Gに向けた研究開発が盛んにおこなわれており、国際標準化と社会実装が10年単位で進むことが想定されている。通信事業者に依存せず、自営で4Gや5Gを整備することも可能であり、B5Gや6Gの時代は公衆網と自営網がより緊密に連携できる可能性が高い。

養殖施設や定置網などのスマート化には、センサーデータなど小データを極小電力で送れるIoT用のネットワークが必須である。LTEベースのサービスは、概ね駿河湾内でも使用できる。自営系の設備を設置して独自にエリアを充実させることも可能である。

② HAPS

海上での通信インフラとして、今後注目すべきはHAPS (High Altitude Platform Station) と低軌道周回衛星 (LEO: Low Earth Orbit) である。

HAPSとは、高度11km～50kmの成層圏に飛行機を飛ばしそれを電波塔のように使うものである。成層圏は風が極めて穏やかで安定しているので、大型の飛行体を比較的少ないエネルギーで長期間飛行させることが可能とされている。そのため通信以外の使用目的を含め、HAPSそのものの開発が世界中で進められており [6]、数週間レベルの連続飛行にも成功している [7]。高度20km程度の場合、200km程度の範囲を電波カバレッジとすることができ、山間部や海洋や離島をカバーできる (図2)。また地震や津波など災害にも強い。無線方式としては、4Gや5Gシステムをそのまま利用することが技術的には可能で、必要な標準化と法制度整備が進められているので、普及しているスマホなどがそのまま使えるようになる。近い将来、空飛ぶ基地局として広く実用化されることが期待される。



図2 成層圏プラットフォーム：HAPS

③ LEO Constellations

衛星を使った通信システムとしては、地上高約36,000kmの静止軌道上の衛星を使用するものが広く使われてきた。全世界を3個の衛星でほぼカバーできるので、大洋上のサービスを一手に担ってきた。電波の伝搬距離が長いので、大きな電力を必要とし、必然的に高速データ通信のためには、超大型の衛星や比較的大きな地球局アンテナが必要となる。また36,000kmを光の速度で往復すると240msかかるので、大きな遅延が生じる。

静止軌道より低い高度の衛星 (LEO) は、地上から見ると高速で移動していくため、衛星を追尾する技術が必要となる。また地球をカバーするためには多数の衛星が必要となるので技術的にも経済的にも容易ではなかった。しかし再利用可能なロケットが実用されて大量の衛星を打ち上げることが可能になり、LEO Constellationsを用いる通信システムが多数計画され実用が開始している。SpaceX社が提供するStarlinkシステムは、2021年にサービスを開始し、日本でも2022年9月からサービスが提供されている。高度約500kmに4,408機 (2022年末に約3,300機) もの衛星を打ち上げ (図3)、40cm程度のアンテナで200～

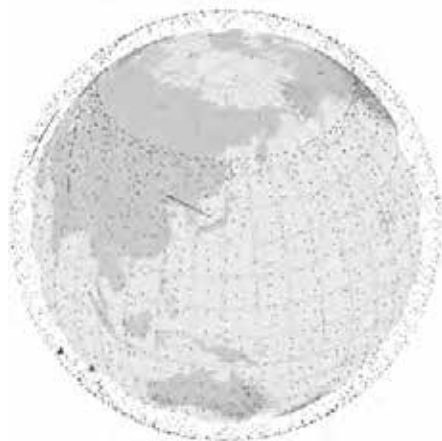


図3 Starlink 衛星の配置 (2023年1月)
高度500kmの軌道に4,408機の衛星を配置
(2022年末: 約3,300機)

300Mbpsの高速インターネットサービスが利用できる。天空が十分に見える場所であれば、山間僻地や離島でも利用できる。1万台規模の地球局で戦争下のウクライナの通信基盤を迅速かつ広範に支えていることからその有用性が示されている。

地球局は、高速で移動する衛星を追尾しかつ分単位で衛星を切り替えていくため、電子的にビーム方向を高速に変更できるフェーズドアレイアンテナを使っている。そのため、動揺のある船舶等にも容易に適用できる。海上でのサービスもすでに各国で開始されている。日本では、領海内での使用が2023年前半には許可される見通しであり、駿河湾でのスマートオーシャン実証にはすぐに活用できる。日本船籍の公海上での利用については、法制度整備を待つ段階である。

陸上や海底ケーブルでは光ファイバーが使われる。ファイバー中の光の速度は光速の2/3である。Starlinkシステムでは、多数の衛星と衛星の間が光空間伝送で繋がれている。光空間伝送なので光速の1倍である。大陸間レベルの距離では、地上-衛星間の往復1,000kmを考慮しても、空間伝送のLEOの方がファイバー経由よりだいぶ遅延が少なくなる。地上ファイバー系の全光化ネットワークと同様に、近い将来に全光空間ネットワークがLEO上に実現する。

④スマートオーシャン通信基盤

海のスマート化のための通信基盤として、大型船舶や洋上プラットフォームを用いる方法が考えられる。例えば図4のような洋上プラットフォームを設け、エネルギーと通信のハブとする。陸上からの固定無線、Starlinkのような衛星バックホール、あるいは陸と結ぶ光ファイバーでバックホール回線を確保する。5G、LPWA、Wi-Fiなどの通信アクセスサービスを洋上プラットフォームのアンテナタワーから提供し、船や養殖設備や定置網が利用する。5G等で標準化されている端末間通信の仕掛けも活用できる。洋上の養殖設備等に対して、マイクロ波電力伝送で電力を供給することも可能である。さらに、洋上データセンターを設けることで、情報のローカル処理と集約を図る。

沿岸からのサービス、洋上プラットフォームやHAPSやLEOからのサービスを様々に使うことで、海洋に関わる多様な情報を多元的に集め、総合的に分析しモデル化することで、サイバー空間に海洋のデジタ

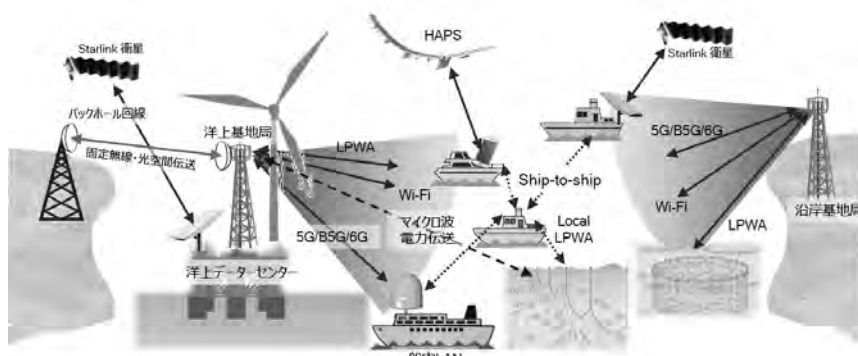


図4 洋上プラットフォームと洋上ネットワーク

ルツインを構築する。フィジカル空間と高度に融合させることにより、スマート物流、スマート漁業、サステナブルオーシャンを実現していく。さらには、スマートシティやスマートファクトリーと連携させていく。

おわりに

超スマート社会（Society 5.0）の実現に向け、海洋のスマート化に向けた活動の一端を紹介した。さまざまなターゲットに向けて研究、開発、実証、社会実装が段階を踏みながら進められている。東京工業大学でも、生体分子センサー研究を応用した自律養殖ユニット、船舶自動航行や港湾ロボティクス、漁業従事者の身体負担解析に基づく作業アシストスーツなど様々な関連研究開発を進めている。

研究成果を社会実装していくためには、アカデミアが早い段階から産業界や地域社会や消費者と密接な関係を持ち、現実課題を解決していくことが必要である。海・陸・空・宇宙は物理的に連続的に繋がっており、スマートオーシャンの課題も必要なプラットフォームも、海単独で検討すべきものではないことは当然である。デジタル田園都市国家の様々なモデルや施策と連携しつつ進めることにより、未来社会へのイノベーションを創造していくことを期待する。

<参考文献>

- [1]閣議決定、「科学技術基本計画」平成28年1月22日。
- [2]「超スマート社会推進コンソーシアム」<https://www.sss.e.titech.ac.jp/about/>。
- [3]「デジタル田園都市国家構想総合戦略」<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/digitaldenen/sougousenryaku/index.html>。
- [4]「駿河湾スマートオーシャン議員連盟設立総会」https://www.youtube.com/watch?v=FysXIY2cm_M。
- [5]笹川平和財団海洋政策研究所、「スルガベイススマートオーシャン・シンポジウム」<https://www.youtube.com/watch?v=t78U6My9RUg>。
- [6]F. D' Oliveira, F. Melo and T. Devezas, "High-Altitude Platforms – Present Situation and Technology Trends," Journal of Aerospace Technology and Management, vol. 8, no. 3, pp. pp. 249-262, 2016.
- [7]Airbus, "Zephyr High Altitude Platform Station (HAPS) achieves connectivity in trial conducted by Airbus and NTT DOCOMO," <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-11-zephyr-high-altitude-platform-station-haps-achieves-connectivity-in>, 15 November 2021.

編集後記

■東京工業大学の卒業生は、産業界要所要所で活躍中であり、どちらかと言えば控えめで、時代で目立つ役者と言うより、時代を支える影武者的軍曹感が漂う。「燕のマークは在学中によく見かけました」、「スクールカラーが青だったとは知りません」、「校歌は入学式で聴いたことがある」と大学の帰属意識よりも最初から世界規模で勝負する工学探求が前提と捉える広い野心を感じる。寡黙で、流行に付和雷同せず、時代からも独立独歩の存在感を醸し出し、東工大卒であることをおごり高ぶることはなく、あくまでもぶれない硬派な要素を持している。本来の科学研究者の姿なのであろう。

東工大関係者のICTレポートや学会誌紙面は、基礎工学力や基盤技術習得が前提の数式やグラフ表記が目立つ。「難易度が高いと比例して敷居が高いかも？」という思い込みで敬遠していた当大学特集を今回編集企画するに到った。寄稿要領で「わかりやすくご紹介願います」が功を奏したか、どの先生も冒頭からぐいぐい引き込み、心も掴まれる。入学に至る学力、在学中の集中力、卒業後の探求心、好きな分野への没入研究邁進力には敬意に値する。商学部、文学部からの学内交流・ツッコミはなく、演劇部や運動部の叫び声、左右両派の演説やタテカンなどから影響、感化、逸脱することもなく、工学に埋没できる学術環境は羨望である。2種のヒルズに「大」の名が付く本部キャンパス「大岡山」は、3つの駅を跨ぐ広大な敷地で、都内モノづくり町工場ご近所でもあり、昭和の重厚長大産業を支えた川崎をも一望できる。そこから西へ回る太陽の動きと比例して世界へ展開できる日の出ずる最東から発信する「工学の頂点/ピークヒルズ」を東工大にこれからも期待したい。(20世紀最大メディアのテレビジョン研究開発者の高柳健次郎博士も東工大OB。「杉のお山」)

■早いものでもう3月。全力で応援した「箱根駅伝」が、もう随分前のように思えます。

娘達、叔父を含め、「中央、早稲田、駒澤」のOB、OGがいる我が家はお正月の2日間「箱根駅伝」に釘付けでした。駒澤大学在籍中の娘は、復路沿道に駆けつけ応援、その後急いで帰宅して最後まで全力で応援！結果、「駒澤大学が総合優勝」、念願の学生3大駅伝「三冠」を達成です！来年は箱根駅伝が100回目を迎えるということで、全国の大学が予選会へ参加可能、本戦の出場権を獲得します。関東勢以外の出場のハードルは高そうですが、101回以降も全国の大学参加可能を継続してもらいたいと思います。

私は藤沢市民になった記念として「藤沢市民マラソン」に初参加。数年ぶりのマラソン大会はドキドキでしたが無事完走できました。藤沢市民マラソンは距離が10マイル(約16km)。ハーフマラソン(約21km)より短い分精神的にかなり楽。大会当日の天気は晴れ、風は弱く気温2度。走ると身体が温まり、まさにマラソン日和でした。総勢7000人近くが江の島をスタートする様は迫力満点。沿道で応援してくださる方の声を励みに走りました。結果は、女子全体1535人中572位、〇十代の部では525人中213位。大満足の結果です。年齢別参加者数は、男女とも50代、40代、30代、の順にが多く、完走者の最高年齢は、男性は80代4名、女性は70代19名でした。ある程度の年齢になると健康診断などで健康不安を感じ、効率の良い有酸素運動としてジョギングから。走れるようになると大会参加を目標として継続されている方が多いのでしょうか。70代まで走る自信はありませんが、毎年参加を目指し、健康のパロメーターにしようと思いました。来年は元陸上部の娘も参戦するらしいので、「母娘対決」が今から楽しみです。(みんな)

2023 3 No.351 電波技術協会報

フォルン
Future
Of
Radio
Network
FORN

No.351 / 2023年3月10日発行
発行 一般財団法人 電波技術協会
発行人 矢橋 隆
編集 FORN 編集担当 (杉山 博、松浦 美恵)
本部
〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-2-3 アーシビル 9F
TEL 044-965-1200 FAX 044-965-1222
新百合ヶ丘事業所
〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-12-6 京野ビル
TEL 044-951-0111 FAX 044-951-0201

送付先変更のご連絡やお寄せいただくご意見・ご感想は、下記の弊協会HPの「お問い合わせ」ページ、またはFAXにてお知らせください。

URL : <https://reea.or.jp/contact/>
FAX : 044-965-1222

ホームページアドレス <https://reea.or.jp/>
印刷所 株式会社真興社
禁無断転載


Radio Engineering &
Electronics Association