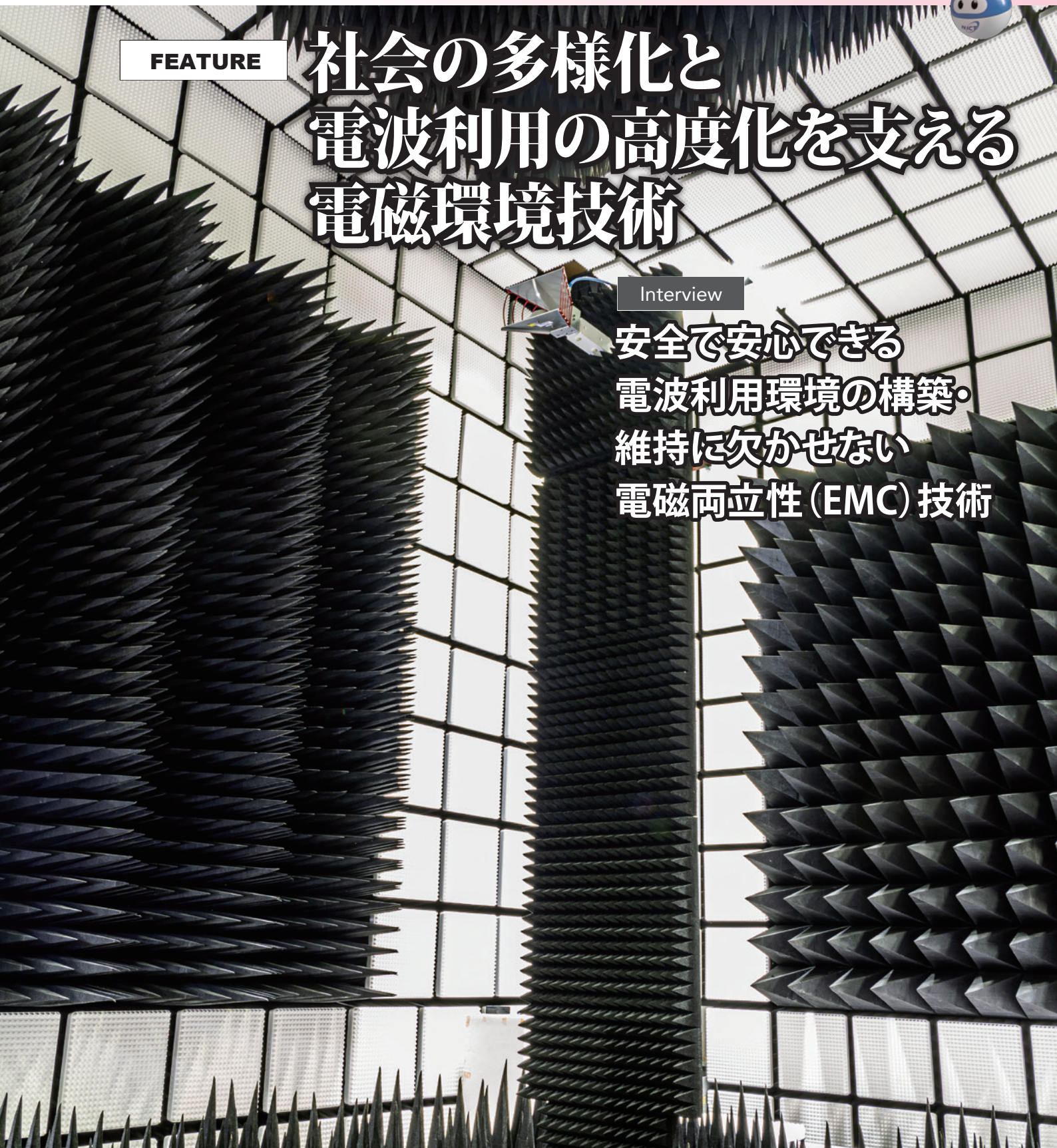
NICT NEWS

国立研究開発法人
情報通信研究機構

No.2
2024
通巻 504



FEATURE

社会の多様化と電波利用の高度化を支える電磁環境技術

Interview

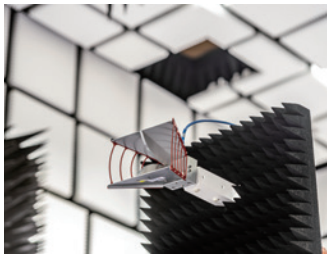
安全で安心できる電波利用環境の構築・維持に欠かせない電磁両立性（EMC）技術

CONTENTS

NICT NEWS 2024 No.2 通巻504
国立研究開発法人情報通信研究機構

FEATURE

社会の多様化と電波利用の高度化を支える電磁環境技術



Interview

1 安全で安心できる電波利用環境の構築・維持に欠かせない電磁両立性（EMC）技術
後藤 薫

4 電波レベルモニタリング
実環境の電波を測る！
大西 輝夫

6 安全で持続可能な電磁環境の構築
不要電磁波の集積効果や電磁環境劣化を予測するモデルの研究開発
呉 奕鋒

8 人体に対する電波ばく露評価技術
長岡 智明

10 ミリ波・テラヘルツ帯の電波計測技術
Beyond 5Gの実現に向けて
藤井 勝巳

TOPICS

12 電波暗室探訪
取材協力：藤井 勝巳

13 NICTのチャレンジャー File 28　山崎 祥他
温度で明るさの変わる蛍光プローブを利用した擬似生体組織の高精度な温度分布測定

INFORMATION

14 研究職・研究技術職・総合職　採用2025

14 NICTオープンハウス 2024 開催のお知らせ

表紙写真：電波暗室
金属で囲んだ壁・床・天井に、電波吸収体を貼ることによって、電波が漏えい・反射・反響しない空間を実現した実験室。電波暗室の内外で電波環境が分離されるため、実験中の電波が外に漏れない、逆に、外で使われているスマホやテレビ放送などの電波が入ってこない特長を持つ。
シールド寸法：
長さ12 m×幅7 m×高さ6.8 m
室内寸法：
長さ10 m×幅5 m×高さ4.8 m

左上写真：電磁雑音測定用アンテナ
周波数1 GHz～18 GHzの電磁雑音を測定できる広帯域アンテナの一つ。一般に、通信・放送に用いるアンテナは、使用する周波数でだけ動作するように設計されるが、電磁雑音測定に用いるアンテナは、どの周波数に発生するか分からない電磁雑音を測定しなければならないため、広い周波数帯域で電波を受信できるように設計されている。

（表紙写真、左上写真の詳細はP12をご覧ください。）

Interview

安全で安心できる電波利用環境の構築・維持に欠かせない電磁両立性（EMC）技術

スマートフォンなどの通信に使うデバイスは私たちの生活に欠かせないものとなっている。スマートフォンだけでなく現代社会ではあらゆるところで無線通信が利用されており、快適な社会全体を支えている。しかし、目に見えない電波が複雑に混みあう中で、電波が他の無線通信や電子機器に与える影響や、人体に与える影響はいかなるものであろうか。今回は、電波利用環境の安全性・確実性を支える電磁両立性（EMC）技術の現状と未来について、電磁環境研究室の後藤薫室長に話を聞いた。

後藤 薫（ごとう かおる）

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
室長

2002年博士課程修了後、電気通信大学菅平電波観測所助手を経て、2003年CRL（現NICT）に入所。NICT入所後は、通信システムEMCに関する研究に従事。2023年から現職。
博士（工学）。

――EMCとは何でしょうか。

後藤　一般の方にはあまり馴染みがないかもしれませんが、EMCとはElectroMagnetic Compatibilityの略語であり、日本語では「電磁両立性」と呼ばれています。様々な無線機器や電子電気機器から出ている電波が互いに干渉したり妨害したりすることなく、多くの機器を両立させ共存して使っていけることを目指すところから始まった研究分野です。現在は、電波が人間に対して与える影響についてもEMCに包括して研究されています。

私たちの身の回りには、スマートフォンや無線LANをはじめ、電波を利用して通信を行う機器がたくさんあります。またそれと同時に、これらの通信機器のほかにも、多くの電気電子機器が存在しています。それらの機器から不要な電波（電磁雑音）が放射されていると周囲の無線通信や放送に干渉し、通信が切れてしまったり放送の画面にブロックノイズが表れてブラックアウトしたりしてしまいます。

このような電波の干渉現象は古くから知られており、雷が鳴った時にAMラジオからガリガリという音が出ることを経験されている方も多いと思います。現在は無線通信・放送技術が発達し、ほとんどがデジタル化されていますが、電磁雑音は今も無線通信の大敵です。電気電子機器の内部で電流の時間的な変化が発生すると、周囲に電磁界を作り出し電磁雑音となります。また、電磁雑音から干渉を受ける側である無線通信機器に着目すると、スマートフォンのような無線通信機器を1人複数台持つようになり、電波

Interview

安全で安心できる電波利用環境の構築・維持に欠かせない電磁両立性（EMC）技術

利用の空間密度が非常に高くなっています。さらに、4K8K動画の視聴などで大量のデータ通信を行うために、これらの機器が使用する周波数帯は高くなり、帯域は広くなっています。周波数が高くなると、機器のわずかな位置や向きの変化で電磁放射の状態が変わります。加えて、微弱な電波を出し続けるIoT（モノのインターネット）の機器が至るところに設置されるなど、電波利用環境はますます複雑になってきています。

電磁環境研究室は、このような複雑な電磁環境の中で、機器同士の電磁波の干渉を回避し、電磁雑音による誤作動を起こさず、さらには電波が人体に悪い影響を与えないように、安全で安心な電磁環境の実現を目指して、研究開発から国内外の規格策定への貢献までを一貫して行っています。

■高周波への移行とともにますます重要性を増すEMC

――電磁環境研究室の構成はどのようになっていますか。

電磁環境研究室は4つの研究プロジェクトと1つの業務グループで構成されています。

4つの研究プロジェクトには、身の回りの様々な環境における電波ばく露レベルのデータを測定し蓄積する「電波ばく露モニタリングプロジェクト」、電磁雑音の干渉評価法を研究する「通信EMCプロジェクト」、電波測定の基盤技術や較正システムの研究開発を行う「較正技術プロジェクト」、電波が生体へ与える影響の評価技術を研究する「生体EMCプロジェクト」があります。

各プロジェクトによって研究内容は異なりますが、電磁環境研究室の共通の目的は、電気電子機器から放射される電磁雑音や無線通信機器から放射される電波が、他の機器や人体に与える影響をどのように評価すればよいかを研究し、電磁波が周囲に悪影響を与えないようにするための効率的かつ合理的な手段とルールを定めることです。

EMCには、電磁雑音の放射を意味するエミッション（emission）と、電気電子機器が電磁雑音に耐える能力を表すイミュニティ（immunity）の二つの概念があります。エミッションにおいては、周囲の無線通信・放送システムに電磁干渉しないための許容値が必要です。イミュニティにおいては、電気電子機器が誤動作を起こさない目安とするための、電波の試験照射レベルを定める必要があります。電気電子機器が他の機器を妨害せず、またほかから影響を受けないような耐性を持たせることで、互いに共存できる電磁環境を実現することが電磁両立性の基本です。

NICT電磁環境研究室には、中立・公平な立場から、良好な電磁両立性の維持に貢献するという使命がありますので、そのためのルール作りも行っています。様々な電気電子機器の電磁雑音を測定・評価し、無線通信・放送の保護のために必要とされる電磁雑音の許容値やその測定法を開発し、ルールに反映させていきます。電気電子機器は国際的に流通するものですから、そこから発生する電磁雑音の規制のための国際標準が必要になります。国際標準は、CISPR（Comite international Special des Perturbations Radioelectriques　国際無線障害特別委員会、シスプル）という組織で定められており、電磁環境研究室からもたくさんの研究者が規格の策定に参加しています。

――複雑な電磁環境の中での問題解決の研究なのですね

後藤　そのとおりです。EMCは電波を使う際にどうしても避けて通れない相互干渉や悪影響を評価し、合理的な基準を設けることでそれを回避したり低減したりするための研究分野です。そのため、電波に関するあらゆる知識が必要となります。電磁気学・電波工学・アンテナ工学・計測工学はもちろんのこと、電波を当てる対象となるものを深く理解するために、通信工学、化学、生理学等の知識も必要になります。そのため当研究室には多岐にわたる分野から研究者が集まってきており、非常に幅の広い刺激に満ちた研究のできる場であると言えるでしょう。

また、近年のEMC研究の特徴としては、サブテラヘルツ帯、テラヘルツ帯と呼ばれる極めて高い周波数における評価が求められるようになっていることが挙げられます。Beyond 5G/6Gの規格検討が進められていますが、そこでの利用が検討されている周波数帯であるためです。EMC研究としてまず着目しなければらないのは、人体への影響を評価する技術の開発です。生体EMCプロジェクトでは、テラヘルツ帯における人体の電気的性質を模擬して電波のばく露実験対象とするための人体等価ファントムや数値人体モデルの開発、ジャイロトロンを使用

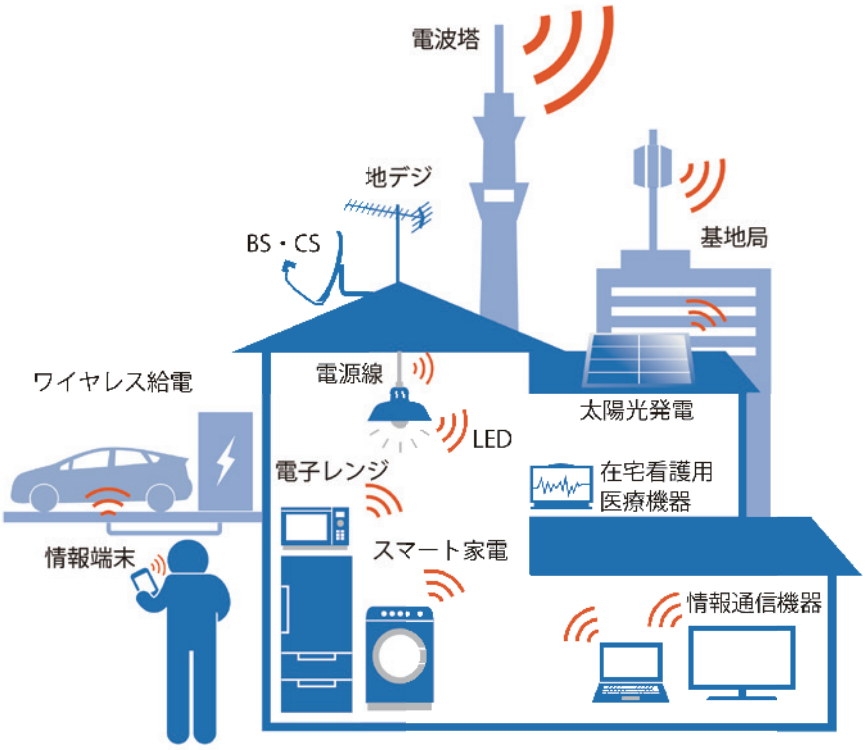
した電波ばく露装置の開発、電波ばく露による皮膚表層の温度変化を測定するシステムの開発を行い、テラヘルツ帯の電波の安全な利用を牽引しています。

テラヘルツ帯におけるもう一つの重要なEMCの課題は、無線用測定器の較正技術の開発です。無線設備から電波を発射するためには無線局免許が必要であり、免許申請の際には、電力などの「正しい値」を示すことが保証された無線用測定器を用いて電波の品質を測定し、検査を受ける必要があります。電波法におけるこの「正しい値」は、NICT電磁環境研究室の標準較正グループによる較正とそれに基づいて発行する成績書によって担保されます。

一方で、Beyond 5G/6Gの研究開発が盛んに行われる中で、通信システムの開発サイドはまず実験試験局を設置してシステムの評価を行うことがほとんどです。その実験試験局免許を交付するためには、Beyond 5G/6Gの周波数帯で較正された無線用測定器が必要です。そのためBeyond 5G/6Gの開発に先んじて、その周波数帯の較正システムを完成させなければなりません。遅れをとれば我が国のBeyond 5G/6G研究のボトルネックともなってしまう、電波利用の根幹を担う業務であるため、電磁環境研究室では、研究プロジェクトと業務グループでもって一丸となり、1THzまでの較正システムの開発に取り組んでいます。

――電波利用に関するリスクコミュニケーションも重要ですね

後藤　携帯電話等で使用する周波数が高くなっていくに従い、これまで以上に電磁波の利用に不安を感じている方もいらっしゃいます。当研究室の「電波ばく露モニタリングプロジェクト」では、様々な環境で電波ばく露レベルデータを取得・蓄積しており、データの公開を予定しています。さらに、これらのデータに基づいた情報の提供や相互コミュニケーションをどのようにして行えば、実際の状況を正しく効果的に伝えることができるか、すなわちリスクコミュニケーションの研究を開始しました。これは当研究室における最新の取組です。従来のように電波利用に対する安全を図るだけでなく、科学的データに基づく事実を正しく伝えることは、中立性、透明性、信頼性を併せ持つ国の研究機関としての重要な役割であると考えています。



EMC：通信・機器・生体間の電磁的相互影響

■これからのEMCのテーマは「調和」

――これからの展望は

後藤　まずトレンドとしては先に述べたように、電波利用が極めて周波数の高いテラヘルツ帯に向かっていることを挙げます。この流れには確実に対応していかなくてはなりません。当研究室で特に意識していることですが、従来のEMC研究のように問題が出てきてから対処するのではなく、我々が最新技術動向を踏まえた上で、社会からの要請を先読みして、先行して研究開発を進めていくことが重要だと考えています。

二つめは無線通信機器や電気電子機器の利用形態が空間的に高密度化していることです。例えば自動化されたロボットが働いているような工場や倉庫において、電波干渉による誤作動は非常に危険であり、経済的損失も大きいです。無線通信機能を搭載し自律的に動作・移動するロボットなどのEMCをどう扱っていくかということは大きな課題と考えています。

最後に挙げたいのは、電波に関する、人の意思への作用に基づいた、人への適切なインターフェースです。電波利用を行う主体は人間であるため、先に述べた電波のリスクコミュニケーションの研究は、AI技術の進化が目覚ましい社会の中にあっても、電波が人間の意識に触れるといった目に見えない領域として最後まで残る難解な課題だと思います。私は、以前に他紙への寄稿の中で、「成熟した社会では、人と人との心理的調和が重んじられるように、科学技術の発達した社会においては、モノとモノとの間の電磁的調和が大切になってくるということではないでしょうか」と書いたことがあります。今の考えはそこからアップデートされており、今後は、モノとモノに「人」を加えた場合の電磁的調和を目指して、研究開発を推進していきます。

――本日はどうもありがとうございました。

電波レベルモニタリング

実環境の電波を測る!

大西 輝夫
（おおにし てるお）
電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
研究マネージャー

企業勤務後、2019年にNICT入所。電波ばく露レベルモニタリングに関する研究開発に従事。博士（工学）。

我々の身の回りには電波を利用した様々な機器があふれています。放送、携帯電話システム、無線LAN等からの電波は、電波防護指針に基づき、人体に悪影響を及ぼさない範囲で利用されています。一方で、電波は確実に身の回りに存在しながら、目に見えないために、どのような強さなのか分からないということから不安に思う方もいます。そこで、主に日常生活における電波環境を網羅的に明確にすることを目的に研究を行っています。

■背景

我々の身の回りにある電波を利用した機器の安全性については、総務省「生体電磁環境に関する研究戦略検討会」の2018年の報告書で、リスクコミュニケーションに関する研究に関して、様々な発生源からの電波の強さを網羅的に測定してそのデータを長期的に蓄積し、電波ばく露レベルの情報を広く共有することを求めています。

NICTでは、情報通信分野を専門とする我が国唯一の公的研究機関として、電波ばく露レベルモニタリングデータの取得・蓄積・活用の研究を2019年度（令和元年度）に開始しました。本研究は、主に日常生活における電波環境を網羅的に明確にするとともに、電波利用の発展と拡大に伴うリスクの可能性についての適切な説明と対話を可能にするリスクコミュニケーションの在り方を示すことを目的としています。本稿では、電波ばく露レベルモニタリングについて紹介します。

■電波ばく露レベルモニタリング手法

電波ばく露レベルを網羅的に把握するためのモニタリングの手法については、図1に示すとおり、スポット測定及び長期定点測定、小型の測定装置を個人が携帯することによる携帯型測定、測定装置を搭載した車（電測車）による測定等に大別できます。スポット測定は、任意の測定地点で測定することができますが、広範囲な測定を行うことは人的リソースの観点から難しいという欠点があります。長期定点測定は、場所を固定し連続で長期の測定を行うものです。一方、電測車による測定では、測定器を搭載し走行することで、地点ごとの時間変動測定はできませんが、電波ばく露レベルの広範囲な測定が可能となります。また、小型測定装置を個人が携帯する手法では、上記と異なり個人の電波ばく露量を継続的に観測することが可能です。このような測定は、微小環境測定とも呼ばれています。これらの特徴を組み合わせることで、データの偏りを抑え、大規模かつ詳細な電波ばく露レベルのデータを取得することができます。

図1　モニタリング手法

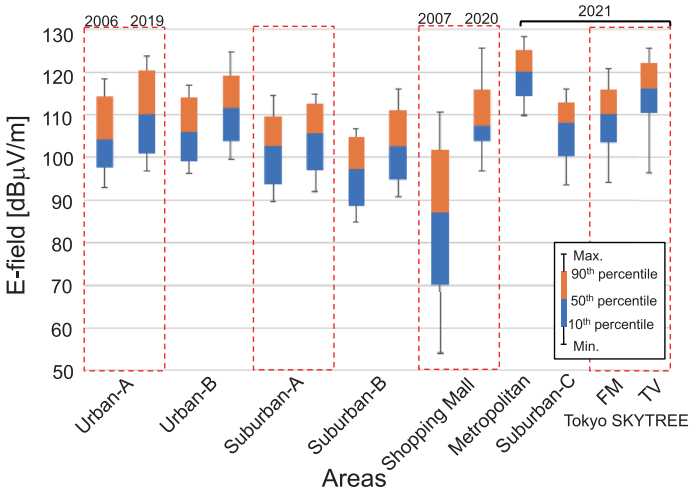


図2　携帯電話基地局及び放送送信所からの電界強度

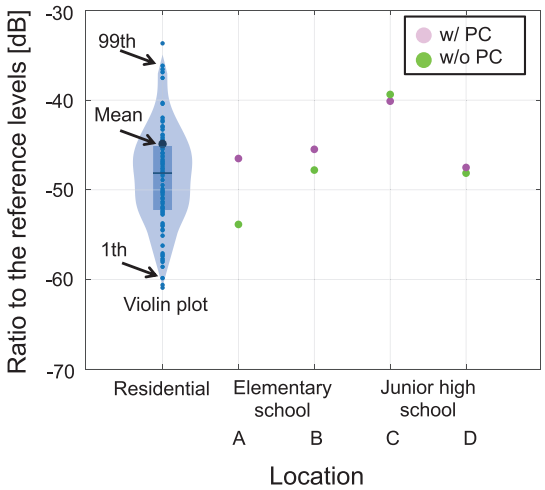


図3　住居内・教室内の測定結果（電波防護指針との比）

■測定結果（屋外・地下街）

携帯電話基地局及び放送送信所に関するこれら全帯域の電界強度[dBμV/m]の結果を箱ひげ図に示します（図2）。また、市街（Urban）A/B、郊外（Suburban）A/B、地下街（Shopping mall）は過去の総務省による調査結果も比較のために示しました。グラフの上に記載している数字は測定年度を示しています。市街B、郊外A/Bは表示していませんが、市街Aと同じ年度の測定です。都市部（Metropolitan）の電界強度の中央値は他の測定結果と比べて一番高いことがわかりました。また、放送送信所周辺であっても、電界強度レベルは都市部の携帯電話基地局と同じようなレベルであることがわかります。

市街A/B、郊外A/Bについてそれぞれ過去と現在の測定結果を比較したところ、市街地・郊外共に、過去よりも現在の方が電界強度が有意に高いことが分かりました。過去の地下街については、当時携帯電話サービスが地下街の一部で利用できなかったため電界強度が低いと考えられます。全体としてレベルが上昇傾向にはあるものの、いずれの場合も電波防護指針に対して低い（約1/10,000以下）ことが明らかになりました。

■測定結果（住居・教室内）

図3に、住居内48宅及び教室内の測定結果について、住居内は24時間、教室は8時間のデータを6分間で移動平均した携帯電話・放送波や無線LAN全ての周波数帯を積算した値の最大値における各周波数帯の値と電波防護指針値の比を積算して示します。図の1列目は住居内の結果を箱ひげ図とバイオリンプロットで表し、2列目以降は各教室のPC使用授業時とそれ以外の結果を示しています。住居・教室内とも一般環境の電波防護指針より低いこと、また小中学校教室内でPCを使用している場合でも、電波ばく露レベルは住居内の平均値と同程度であることがわかります。

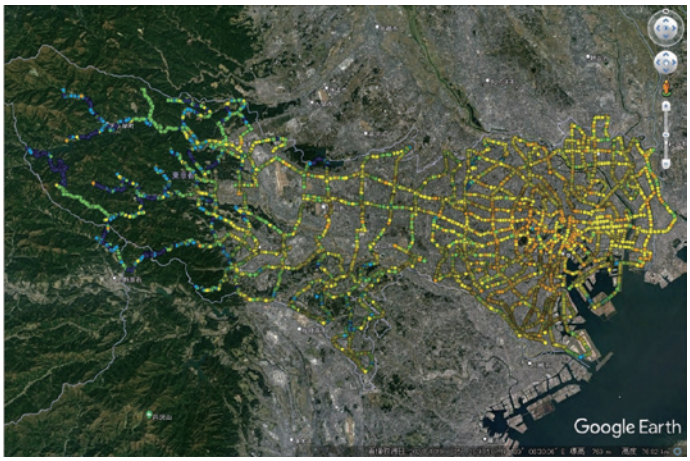


図4　電測車による東京都の電界強度分布

■測定結果（電測車）

電測車は、27 MHz ～ 3 GHz（低周波数用）と420 MHz ～ 6 GHz（高周波数用）に対応する2つの3軸等方性プローブを車の屋根のレドーム内に取り付けたものになります（図1）。2021年度に、日本橋を中心に半径100 km圏内を総測定距離約15,000 kmの測定を行いました。測定経路は高速道路を除く一般道路（主に国道）とし、各市区町村を網羅するように選択しました。図4に例として東京都内の測定結果として、電界強度マップを示します。各測定地点での電界強度を色（オレンジ色が一番高く、次いで黄色、緑、青の順）で表示しており、都心と郊外で電界強度に差があることがわかります。特に都心ではほとんどが110 dBμV/m以上であるのに対して、郊外では110 dBμV/m以下であることがわかります。また、人口密度との関係性について考察を行ったところ、携帯電話基地局からの電界強度と人口密度のべき乗に比例関係があることがわかりました。

■今後の展望

引き続き、日常生活における電波環境を網羅的に明確にできるように研究を進め、測定結果を公開していきます。一方で、新しい無線技術が開発されるとともに様々な製品が我々の身近にあふれています。全てを測定することは不可能ですが、AIなどの技術で補完しながら電波環境の把握を行っていく予定です。

安全で持続可能な電磁環境の構築

不要電磁波の集積効果や電磁環境劣化を予測するモデルの研究開発

呉 奕鋒
（Ifong Wu）
電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
主任研究員
大学院博士後期課程修了後、2007年、NICTに入所。通信システムEMCに関する研究に従事。博士（工学）。

近年、第5世代移動通信システム（5G）に代表される高度化された無線通信サービスが開始される一方で、電気電子機器から生じる不要電磁波の様相も変化しつつあります。特に、IoT（Internet of Thing）機器や省エネ機器の広がりにより機器の同時利用が増加し、電磁雑音レベルの上昇が予測されます。これらの電磁雑音の測定・評価に関する経験的な検討は多いものの、その原因や物理メカニズムの解明には至っていません。私たちは、電気電子機器と無線通信の共存を目指し、その合理的条件を明らかにするための研究開発に取り組んでいます。

■背景

急激な拡大を続けるサイバー空間の持続的な発展性は、スマートフォンなどの通信に使用される電波資源に大きく依存しています。これまで電波資源の高効率利用を目指した通信方式やデバイスの開発が盛んに行われてきました。その一方で、「電気電子機器から生ずる不要電磁波の増加による電波環境の劣化」という視点からの考察はやや欠如していると言わざるを得ません。不要電磁波による電磁環境の劣化に対処するには、大気や水質の汚染、温暖化などの他の環境問題と同様に、個々の排出規制がグローバルな環境に対してどの程度の影響を及ぼすかの予測が必須ですが、有効な知見はほとんどないのが現状です。

現在、電気電子機器から生ずる不要電磁波の許容値は単体の製品が近隣の無線受信機に影響を与えないように設定されています。しかし、この許容基準は、雑音源数の増加によって社会全体の電磁環境の劣化がどれほどに進み、電波利用システムとしての社会インフラにどのような影響を与えるかを考慮したものではありません。そこでNICTでは、通信システムや電気電子システムの拡大と高度化が進む中で、安全で持続可能な電磁環境の構築を目指し、個々の不要電磁波の放射について、巨視的規模における集積効果や電磁環境への影響を予測するモデルの構築といった研究開発を行っています。これまで、一般家庭で広く普及が見

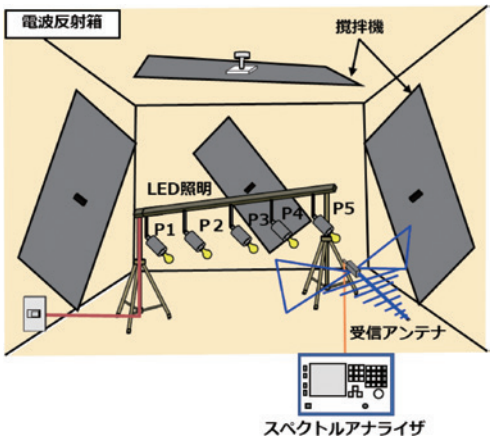


図1　電波反射箱を用いた複数の電磁雑音の測定概略図

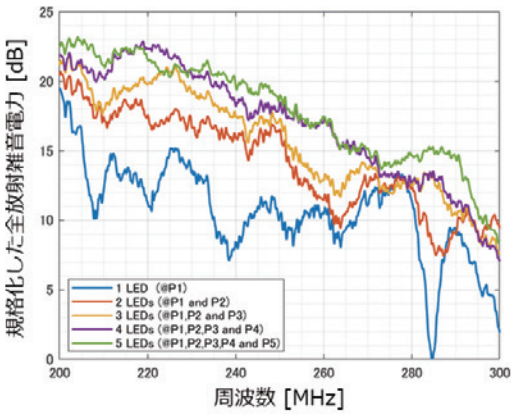


図2　LED照明の数を変化させた場合における全方位放射電力の測定結果

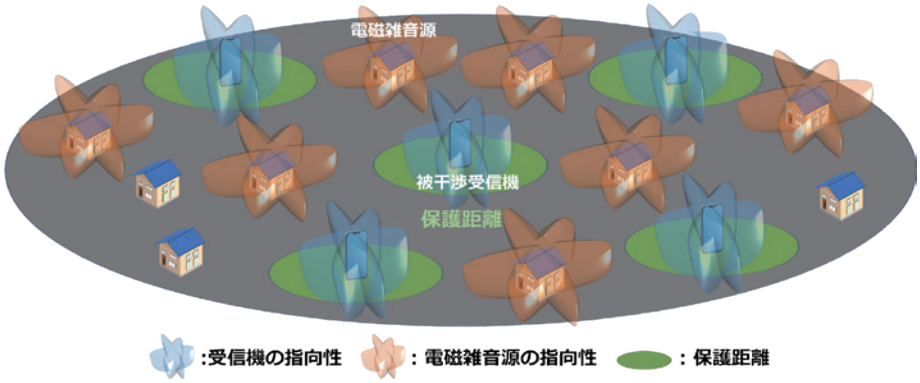


図3　意図しない電磁雑音から無線保護のための干渉モデル

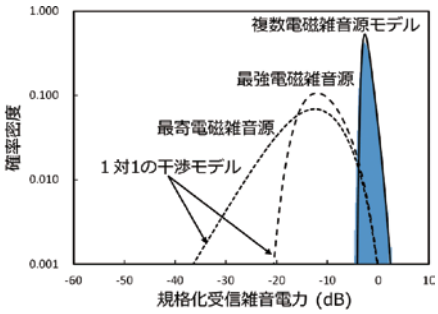


図4　電磁雑音源分布半径が100m、保護距離が1m、伝搬係数が1の場合における電磁雑音受信電力の確率分布の例。
干渉モデルは電磁雑音源の指向性（雑音となる電波が強く放射される方向のパターン）が考慮されているため、必ずしも受信機に最も近い電磁雑音源が最強電磁雑音源（最も受信機に雑音を放射する電磁雑音源）となるわけではありません。

込まれる省エネ機器（例えば、LED照明など）によって引き起こされる不要電磁波の発生メカニズムやその特性について、複数の雑音源が隣接する際の影響も含め、理論と実測を通じて明らかにしてきました（小規模な集積モデル）。また、近郊住宅環境などを想定して多数の雑音源が分布する状況における電磁環境の劣化量を、無線通信環境の背景雑音増加として統計的手法を用いて明らかにしてきました（大規模な集積モデル）。本稿では、5Gなどの無線通信の保護を目的とした、個々の電気電子機器から発生する不要電磁波の評価方法を開発するために、電波反射箱*を用いた小規模な電磁雑音源の放射特性に焦点を当て、更に大規模な電磁雑音源を考慮した電磁雑音許容値設定モデルの構築についてご紹介します。

■電波反射箱を用いた複数の電磁雑音源の特性評価

国際無線障害特別委員会（CISPR）による規格では、製品単体に対して不要電磁波の波源となる放射電磁雑音の許容値が設定されています。しかしながら、複数の不要電磁波の波源が混在する電磁環境下における放射電磁雑音の評価はほとんど行われていません。本稿では、電磁雑音源としてLED照明を使用し、図1に示すように複数のLED照明を同一電源線に接続した場合における電磁雑音の評価に焦点を当て、電波反射箱を用いた結果を紹介します。電波反射箱測定では、電波暗室と異なり、放射される電磁雑音電力の総和を全方向にわたって一度に測定できます。図2に示すように、LED照明からの全放射電力の周波数スペクトルは、LED照明の数に必ずしも比例しないことが確認されました。これは、LED照明の配置が線路上を流れる雑音電流の分布を変え、線路上での雑音電流の共振が複雑になるためと考えられます。

■多数の電磁雑音源による無線保護のための許容値設定モデル

CISPRでは、電磁雑音の発生源に対して、一定距離（＝保護距離）において無線通信の通信品質を保護するために必要な許容値を定めています。現実の環境では、図3に示すように、被干渉受信機が受信する電磁雑音の強度は必ずしも最大ではなく、電磁雑音の放射指向性、電磁雑音源までの距離、伝搬損失、伝搬路上の障害物や建物の影響など、多くのランダムなパラメータに依存します。CISPRでは統計的手法を用いた許容値設定モデルを開発していますが、現行のモデルでは電磁雑音源と被干渉受信機の1対1の干渉を想定しており、図3に示すような多数の雑音源による電磁雑音の集積効果は考慮されていません。NICTでは、電磁雑音源の増加が無線通信の保護に対する許容値設定に与える影響を、2次元モデルを構築して評価を行いましたので紹介します。図4は、高密度に分布する広帯域電磁雑音源を想定した一般性を持ったモデルに基づく最強波源及び全波源による雑音電力の確率分布を示しています。構築したモデルを用いた電磁雑音強度の推定に基づく、許容値の設定が可能であります。

■今後の展望

近年では、IoTやM2M（Machine to Machine）といった最新の情報通信技術によって、あらゆる機器がインターネットにつながるスマートコミュニティが実現しつつありますが、その構成要素である電気電子機器から電磁雑音が発生すると、スマートコミュニティ自体の通信機能に障害を起こす可能性があります。NICTでは、適切な電磁環境の構築と維持を目指し、将来の通信技術の発展と社会の要請に応えるために、電磁雑音の発生メカニズムの解析や評価技術の研究開発を進めています。また、これらの問題を未然に防止するための技術開発にも取り組んでいます。特に、5Gの普及やBeyond 5G（次世代無線通信システム）の研究開発の進展に伴い、多数の電気電子機器（電磁雑音源）と無線通信端末が混在する状況において、電磁干渉を未然に防止するための電磁雑音評価技術の検討にも取り組んでいきます。

用語説明

＊電波反射箱：電波反射箱は図1に示すように金属壁で覆われた部屋の天井や壁に電波を散乱する回転板（撹拌機）が取り付けられた実験施設になります。金属製の箱の内部に導電性の表面を持つ素材を配置することで、外部からの電磁波を遮蔽し、電気電子機器内部で発する電磁波を反射させることで、機器の電磁波を測定することができます。また、電気電子機器から発する電磁雑音（エミッション）の測定にも使われます。

人体に対する電波ばく露評価技術

長岡 智明
（ながおか ともあき）

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
研究マネージャー

大学院修了後、2004年NICT入所。生体電磁環境に関する研究に従事。博士（医科学）。

近年、電波利用の急速な発展に伴って、電波を発射する機器が私たちの身近なところで利用される機会が多くなってきています。その一方、それらの電波に人体が曝（さら）されることによる健康への影響についての関心が非常に高まっています。私たちは無線通信技術の高度化に対応した安全・安心な電波利用環境を構築するため、電波を利用している時に人体のどの部位にどの程度の電波が吸収されるのかを測定や数値シミュレーションによって明らかにするばく露評価（ドシメトリ）技術の研究開発を行ってきています。

■背景

電波利用技術の急速な進展・発展に伴い、電波は様々な分野で利用されており、広く社会生活に浸透する等、今後ますます電波利用が拡大していくことが予想されています。その一方でこれらの多様化した電波発生源から放射される電波の健康影響についての関心も高まっています。電波の生体影響は周波数によって異なり、おおむね100 kHzを境に低周波側では刺激作用が、高周波側では電波が体内に吸収されることによる熱作用が支配的であることが知られています。電波の安全性を考えるとき、電波に曝された人体のどこにどれだけの電波が吸収されるのかを測定または計算によって正確に評価することが重要です。私たちは人体内部での電波の吸収量を正確に評価する、ばく露評価の研究を行っています。特に、倫理的な制約等から人体内部の電波ばく露量を実験的な方法によって評価することが困難であることから、人体を模擬した計算モデルを用いた数値シミュレーションが有効です。私たちは人体に対する電波ばく露量を高精度に推定するために必要不可欠な人体の解剖学的な構造を有した数値人体モデルや、その数値人体モデルを用いた電磁界数値シミュレーションに必要な生体組織の電気定数測定の研究開発を進めています。また、ここでは触れませんがスマートフォン等の実際に使用している無線通信端末が電波防護のガイドラインに適合していることを確認するための適合性確認方法についても研究を行っています。

■解剖学的構造を有した数値人体モデル

2000年以降、医療診断技術の進歩や、計算機性能が向上したことにより、人体を忠実に模擬した高精細数値人体モデルを用いた電磁界シミュレーションにより人体に対する電波ばく露量を精密に推定することが可能になってきました。私たちは、これまでに日本人の平均体型に合致した人体の医療画像に基づいた数値人体モデル（成人男女、妊娠女性、小児等）を開発し、これらのモデルを用いた数値シミュレーションにより、人体への好ましくない健康影響を防護するため、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）が策定しているガイドラインの防護レベルが妥当であることを明らかにしてきました。近年は、電波ばく露評価の研究に用いられてきた小児の数値人体モデルの多くが成人の数値人体モデルを簡易的に縮小したモデルや小児の標準的な体形や内部組織構造が正確にモデル化されていない等の問題があったことから、図1に示す体形及び解剖学的構造が国際的な標準

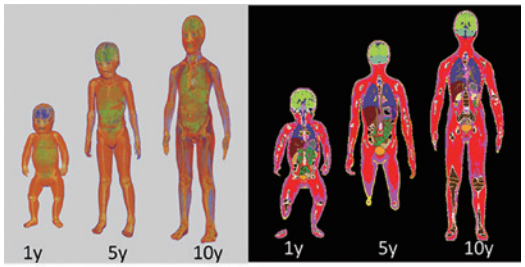


図1　国際標準小児数値人体モデル

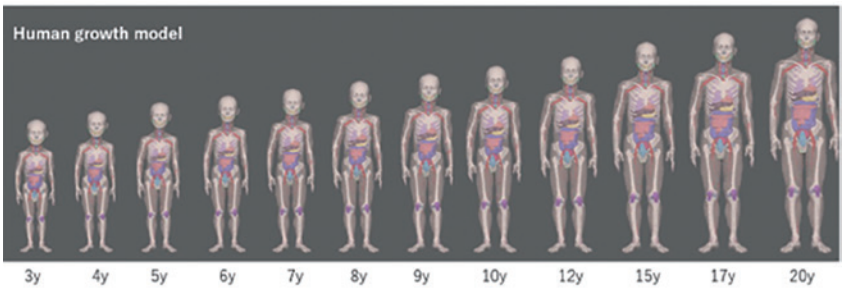


図2　成長・発育モデル

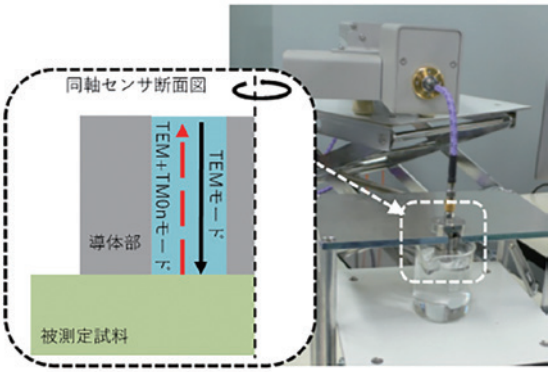


図3　同軸センサを用いた生体電気定数測定

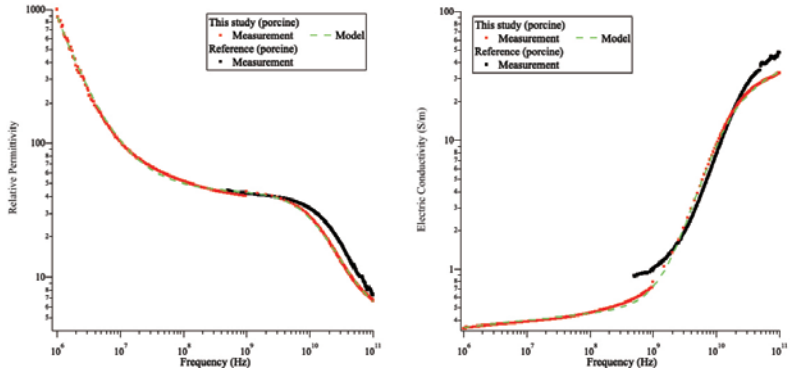


図4　皮膚（真皮）の電気定数の測定結果

値に合致した世界初の国際標準小児数値人体モデル（1歳児、5歳児、10歳児）を開発し、これらの国際標準小児数値人体モデルを用いた電波ばく露評価の成果は2020年に発行された国際ガイドラインの根拠として引用されています。また、従来の数値人体モデルの開発方法とは異なるアプローチによって、図2に示す人体の成長と発育を模擬した数値人体モデルや個人の体形や内部組織構造に合致したテーラーメイド数値人体モデルの構築技術の開発に取り組んできており、一部の数値人体モデルデータは非営利の研究目的では無償で、営利目的の研究では有償で提供しています（https://emc.nict.go.jp/bio/data/index.html）。

■生体組織の電気定数

人体は誘電体と考えられており、その電気定数は組織や臓器、さらに周波数によって変化することが知られています。人体の組織を利用した電気定数測定は、倫理的な観点から現実的ではないことから、人体と類似した構造を持つ哺乳類の実験動物や家畜等の組織が人体組織の代替として、電気測定に用いられています。従来、1996年に英国の研究グループが発表した生体組織の電気定数データベースが、数値人体モデルを用いたばく露評価の研究に利用されており、このデータベースでは20 GHzまで、約40種類の生体組織の測定データで構成されています。第5世代移動通信システム（5G）で利用されている20 GHz超の周波数に対する測定データは、このデータベースには含まれていません。生体組織は水分を多く含むため、材料計測分野で扱われるアンテナ基盤等の材料と比較して、損失の高く（導電率の大きい）、また、皮膚、筋肉、脳など、ほとんどの生体組織はやわらかい材質であり、正確な整形が困難なことから、アンテナから均一な電磁界を試料へ入射し、反射波または透過波を検出し、試料の電気定数を推定する方法である自由空間法や、高周波計測で使用される同軸線路を利用した生体組織の測定において主流な同軸センサ（図３）を用いた測定方法等を利用して、私たちはミリ波帯を含む１MHzから100 GHzまで、58種類の生体組織の電気定数を測定（図４）し、それらの測定データに基づいた大規模な電気定数データベースを構築し、広く公開（https://www2.nict.go.jp/cgi-bin/202303080003/public_html/index.py）しています。

■今後の展望

現在、普及が進む5Gではミリ波帯の電波が利用されており、今後は、更に高い周波数帯の利用が予定されています。さらに、次世代の移動通信システム（Beyond 5G/6G）ではテラヘルツ帯の利用も想定されています。周波数が高くなると電波の吸収は人体表面に集中することから、今後、人体の表面に存在する皮膚や眼球を超高精細かつ忠実に表現した組織モデルの開発や、これらの組織の電気定数を測定し、この周波数帯での電波ばく露特性を高精度に評価する技術等の研究開発を進めることで、引き続き国内外の安全・安心な電波利用環境の維持に貢献できると考えています。

ミリ波・テラヘルツ帯の電波計測技術

Beyond 5Gの実現に向けて

藤井 勝巳
（ふじい かつみ）

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
研究マネージャー

大学院修了後、東北大学電気通信研究所助手を経て、2006 年 NICT 入所。高周波電力計やアンテナ等、無線用測定器の較正及び環境電磁工学に関する研究開発に従事。博士（工学）。

電磁環境に関する研究開発には、電波を正しく測定する技術が不可欠です。たとえば、電気・電子機器から漏れる電磁雑音の強さやスマートフォンから発射される電波の強さについて「これより強くしないこと」と基準を定めても、電波の強さを正しく測定できなければ、基準が守られているかどうか確かめることができません。また、スマートフォンに限らず、テレビ放送や防災無線など、電波を発射する無線局は、無線機から発射する電波の強さや周波数を正しく測定し、他の無線通信を妨害しないことが必要です。私たちは、電波を正しく測定する技術、測定器やアンテナを較正する技術、それらに関連する技術について研究開発を行っています。

■Beyond 5G の実現と ミリ波・テラヘルツ帯の電波利用

2030 年頃の実現が見込まれている次世代移動通信網（Beyond 5G）は、現在の移動体通信網（5G）の通信機能の更なる高度化を目指しており、5Gをしのぐ超高速かつ大容量な通信を実現するために、ミリ波・テラヘルツ帯と呼ばれる、これまでよりも高い周波数帯の利用が検討されています。私たちは、このミリ波・テラヘルツ帯の電波に関する研究開発を推進しています。

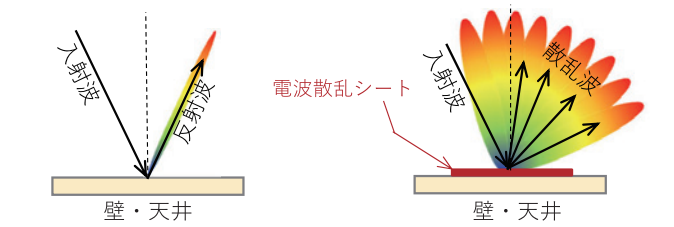
■ミリ波・テラヘルツ波を操る技術

光のように直進しようとする性質が強いミリ波・テラヘルツ帯の電波は、従来の周囲に広がったり回り込んでしまったりする電波を吸収する技術や、たくさんの方向から飛んできた電波の中から必要な情報を取り出す信号処理技術などとは正反対で、様々な方向へどうやって電波を飛ばすか、あるいは、特定の方向からしか飛んでこない電波をどうやって受信できるようにするかといった技術が、研究テーマの一つとなっています。

そこで、私たちは、電波の伝わり方を制御する技術の研究を開始し、ローカル5G のために割り当てられている28 GHz帯で使用することができる「電波散乱シート」を開発しました。直進性の強いミリ波・テラヘルツ帯の電波は、電波が通る線上から外れた領域には電波が届かず、通信できない領域が存在してしまいますが、開発した電波散乱シートを壁や天井に貼ると、電波散乱シートに当たった電波が、様々な方向へ散って飛んでいくため、通信できない領域を減らすことができ、通信が途切れない環境を手に入れることができます。この技術は、例えば、物流センターや工場において、常に移動し続けているAMR（自律走行搬送ロボット）やAGV（自動搬送車）にデータを送り続ける、病院の廊下から各病室に向けて電波を送って電子カルテが入っているパソコンとの通信が途切れないようにする、会議室で人が影になって通信が途切れるのを防ぐなど、様々なシーンでの活用が考えられます。今回、開発した電波散乱シートはメタマテリアル構造を採用しており、厚さ0.8 mmと薄く、軽量で、電源不要です。壁や天井に貼るだけで、ただちに動作するため、手軽に利用できます。現在、製品化に向けた改良を行うとともに、実証実験を重ねています。

■電磁雑音を計測する技術

ミリ波・テラヘルツ帯における通信が



反射　電波散乱シートなし
電波が光線のように一つの方向に反射する

散乱　電波散乱シートあり
電波が様々な方向に散乱する

図1　ミリ波・テラヘルツ波の反射と散乱

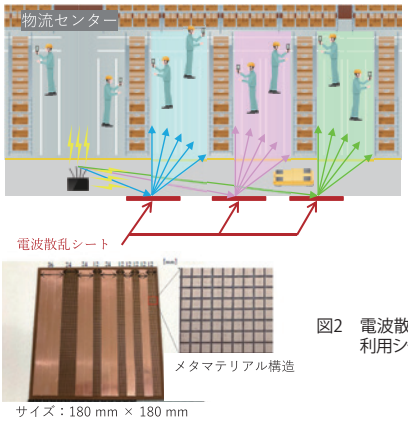
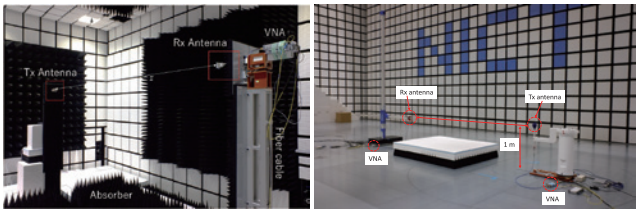


図2　電波散乱シート（試作品）と利用シーンの例（物流センター）



(a) アンテナ較正法　　(b) 電波暗室性能評価法

図3　18 GHz～40 GHz用アンテナの較正法と電波暗室性能評価法の開発

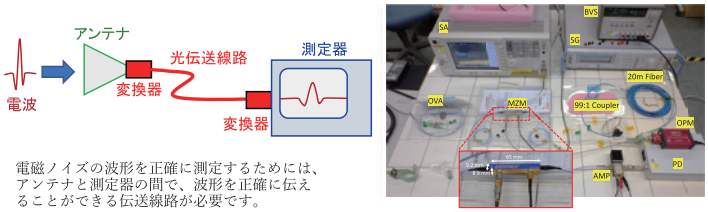


図4　広帯域光伝送線路の開発

利用されるとき、周囲で様々な機器から発生してしまう電磁雑音が、通信を妨げないようにすることが大切であり、電磁雑音の強さを正しく測定し、影響を評価することが必要です。しかしながら、通信のための強い電波と異なり、意図せずに発生してしまう電磁雑音のような弱い電波を正しく測定することは、容易ではありません。

現在、CISPR（国際無線障害特別委員会）では、18～40 GHz において、電気電子機器から発生する電磁雑音の強さを測定する方法について国際規格の策定に向けた検討を行っています。どの国のどの試験場で電磁雑音を測定しても同じ結果が得られるためには、測定器、アンテナ、試験場（電波暗室）、測定者の能力が一定の条件を満たすことが必要です。私たちは、アンテナの較正方法、電波暗室の性能を評価する方法について研究を行い、得られた成果をCISPR 会議の場で報告して、国際標準化を推進しています。

また、現在、光ファイバーを使って、アンテナで受信した電磁雑音の波形を乱さずに測定器まで伝送する技術に関する研究開発も行っています。

■特定実験試験局制度におけるテラヘルツ帯における特例制度への対応

研究開発された無線機を使って屋外や居室で実験するためには、無線機の性能を測定し、総務大臣の免許を受けなければなりません。Beyond 5Gを実現するための研究開発を推進するにあたり、令和4年、世界に先駆けて110 GHz～1.1 THzの電波を使用する無線局（特定実験試験局）の免許申請の方法が定められました。屋外や室内で様々な実験ができるように免許を受けるには、NICT または測定器メーカーが補正値を確認した測定器を使って、無線機から発射する電波の強さや周波数を測定し、その結果を添えて申請することになりました。私たちは、この補正値の決定方法の研究開発と、決定した補正値を免許申請する方々や測定器メーカーに対して提供する方法について研究開発を行っています。令和6年度には500 GHzまで、令和7年度には750 GHz まで、令和8年度には1.1 THzまで補正値を提供できるよう準備を進めています。

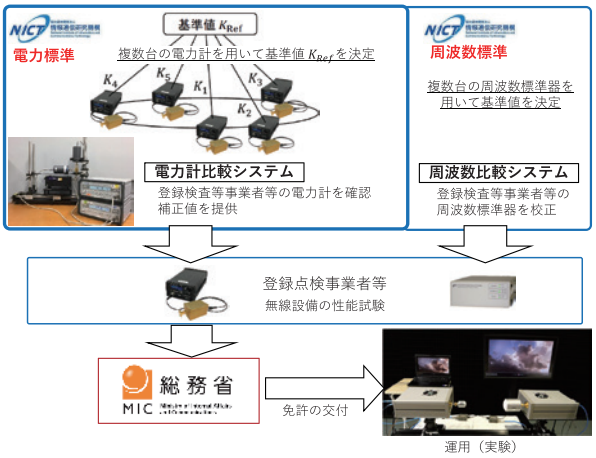


図5　測定器の補正値の提供サービスのための研究開発

■電波を使い続けていくために

電波は目に見えないため、通信のために意図的に発射する電波であっても、意図せずに発生してしまう電磁雑音であっても、アンテナで受信してケーブル類を介して測定器を使って電気信号として計測しますが、測定場、測定方法、そして測定者の能力も、電波を正しく測定するために必要です。私たちは、これからも、電波を正しく測定する電磁波計測技術の研究開発を通じて、Beyond 5Gに代表される新しい通信システムの研究開発や、電磁環境を守るための研究開発、無線免許のために必要な基準値を提供する較正サービスのための研究開発を進めて参ります。

TOPICS

電波暗室探訪

取材協力：電磁環境研究室 研究マネージャー　**藤井 勝巳**

電磁環境研究において、重要な役割を果たす施設、電波暗室を訪問し、これまでに数多くの実験を実施してきた藤井研究マネージャーにお話を伺った。

●電波暗室は無線機器のテストコース？

Q：電波暗室とはどのような施設でしょうか？　そして、何に使われるのでしょうか？

A：電波暗室は、部屋の外側を大きな金属の箱で覆うことで外部からの電磁波の侵入を防ぎ、さらに室内に電磁波を吸収する素材を床天井上下左右6面に貼り詰めることで内部での電磁波の反射を防ぎ、狙った電波だけを測定することができるようにした施設です（図1）。

NICTには、対象とする電磁波の周波数に合わせて、複数の電波暗室があります。

電波暗室は、無線機器の性能や特性を測定する施設で、自動車設計におけるテストコースに例えることができます。新しい自動車を設計、製造する際には試作車をいきなり公道で走らせたりはしません。まずは、ほかの車や人に影響のないテストコースを走らせて、設計通りの性能が実現できているか？法規制通りの安全性が満たされているか？などを確認し、監督官庁の型式認証を受けて初めて、実際の製造や公道走行ができます。同じようにスマートフォンやアンテナなどの無線機器も、設計通りの性能や、ほかの無線機器や人体への影響など安全性が満たされているのかを検査し、総務省の技術基準適合証明等を受け初めて市販されます。つまり、電波暗室は無線機器の設計・製造・販売にとってはなくてはならない施設です。

電磁環境研究室では、こうした意図的に発射する電波の測定とは異なる、意図せずに発射されてしまう電磁雑音（たとえば、パソコンからわずかに漏れる電磁波）の測定方法を研究しています。その結果をCISPR（国際無線障害特別委員会）という国際機関等に提案したりしています。測定方法が国際規格として決められることで、世界中どこでも同じ測定結果が得られるようになり、無線機器の国際的な取引が促進されることになります。これは、NICTの公的機関ならではの役割だと言えます。

Q：今回はどのような実験をされますか？

A：今回は、こちらのスパイラルアンテナという円偏波アンテナの特性を測定します（図2）。円偏波アンテナは、現在BS・CS放送の送受信用に使われていますが、将来はIoT機器や自動車・ロボットなどの自動運転用のミリ波レーダーなどに広く使われるようになると考えています。従来の直線偏波アンテナですと、特定の条件下で対象に当たった電波が反射しなくなる場合があり、レーダー不検知で最悪、衝突の可能性が生じるのに対して、円偏波アンテナから発射した電波では、そうした危険がなくせるためです。

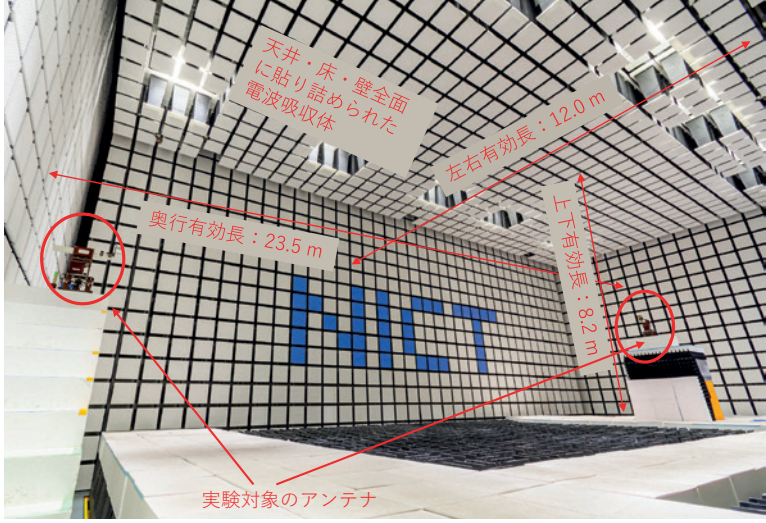


図1 大型電波暗室内部の様子

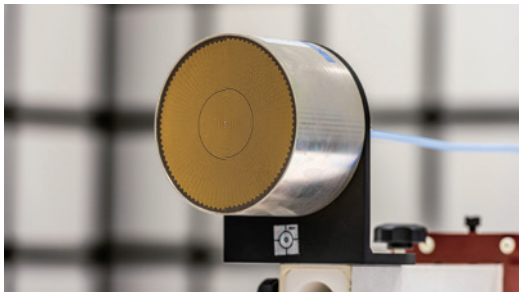


図2　実験対象のスパイラルアンテナ

図3　実験の様子

Q：電波暗室での実験はどれくらいの時間がかかりますか？

A：一つの実験に掛かる期間はおおむね1週間です。電磁環境研究室以外のNICT内の研究室への貸出しも、1週間単位で行っています。実験で一番重要なのが、測定する無線機やアンテナの位置決めで、これは測定する周波数が高くなるほど高い精度が要求されます。

Q：今後の電波暗室の役割はどんなものでしょうか？

A：より高速・大容量の通信を可能とするため、更に高周波数の無線機器が必要とされます。NICTでは、2023年、Beyond 5Gで利用される予定のテラヘルツ波用の電波暗室を新たに開設しました。私たちの暮らしを豊かにしてくれる無線機器、電子電気機器の開発において、電波暗室の役割は今後も極めて重要だと考えます。

温度で明るさの変わる蛍光プローブを利用した擬似生体組織の高精度な温度分布測定

山崎 祥他
（やまざき しょうた）

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
有期研究員
博士（農学）

●経歴
1987年　青森県にて誕生
2015年　東北大学大学院農学研究科博士後期課程　修了
2018年　理化学研究所　入所
2021年　NICT 入所

●受賞歴等
2023年　ICETC2023：Best Paper Award
2017年　テラヘルツ科学の最先端 IV：最優秀若手研究者賞

一問一答

Q 研究者になってよかったことは？

A 最先端の研究に取り組むことで「世界で初めて」の発見や技術開発ができることです。

Q 研究者志望の学生さんにひとこと

A 研究者を続けていると、専門分野が変わることもありますが、別分野の知識ほど役立つことも多く、経験が無駄になることはないです。

Q 休日の過ごし方は？

A バイクでキャンプや釣りに行くことが趣味です。自然の中で遊んでいる時に新しい研究アイデアが生まれることがよくあります。

次世代無線通信Beyond 5Gでは、電波と光の中間領域に位置するテラヘルツ波の利用が想定されています。このテラヘルツ波は私たちの体の表面で強く吸収される性質がありますが、これまで生体の吸収や反射特性に関する研究や人体に対する電波ばく露評価はほとんど行われていません。

テラヘルツ波は体の表面から深さ数百μmのごく浅い領域でほぼ全ての電磁波エネルギーが吸収され、温度上昇を引き起こすことが知られています。そのため、テラヘルツ波の電波ばく露評価では組織表層の温度変化を高い精度で捉えることが重要になります。しかし従来の方法では、体表面の微小な温度変化を高精度に測定することは困難でした。そこで私は、分子サイズの蛍光を発し、その明るさが温度で変わる蛍光プローブに着目し、この蛍光プローブを使用した数十μm領域の温度分布を高精度に評価する技術について研究開発を行っています。

実験的な電波ばく露評価には人体の電気的特性を模倣した水や寒天などを材料とする生体等価ファントムと呼ばれる擬似生体組織が一般的に使用されます。これまで、その材料として温度感受性の蛍光プローブを使用し、共焦点レーザー顕微鏡により蛍光強度を取得することで、内部の温度を空間分解能20μmで3次元に可視化することに成功しており、テラヘルツ波の吸収が起きる表層の温度変化を高精度に評価することが可能になりました。

今後は、空間分解能を含む温度測定精度の更なる向上に取り組むとともに、テラヘルツ波に対する生体の吸収や反射などの応答特性についても研究を進めることで、電波の人体に対する安全性の指標となる電波防護指針が策定されていない、0.3 THz以上の電波ばく露特性の解明へ貢献したいと考えています。

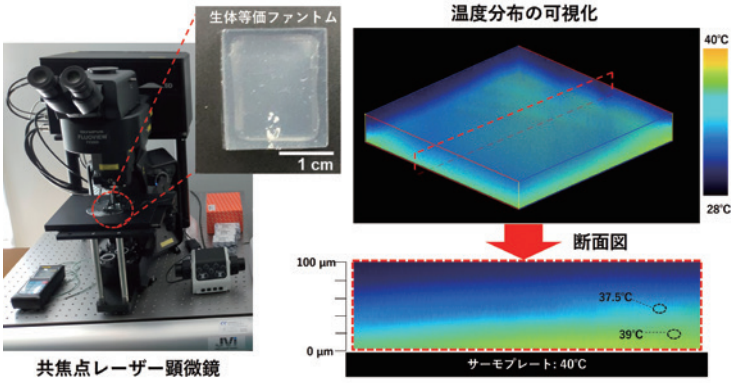


図　温度感受性の蛍光プローブを材料とする生体等価ファントムをサーモプレートで加温し、その内部温度を測定した例

採用 2025

研究職・研究技術職・総合職

NICTは、情報通信分野を専門とする我が国唯一の公的研究機関です。研究者と総合職が一体となって、高いパフォーマンスを発揮し、先端ICTの研究開発に取り組んでいます。これからの未来を創るNICTで、是非一緒に様々なことに挑戦していきませんか？

2024年3月1日

エントリースタート！

詳細については、採用情報のURLをご覧ください。

https://www.nict.go.jp/employment/index-top.html

研究職・テニュアトラック研究員・研究技術職

■募集職種　パーマネント研究職、テニュアトラック研究員、パーマネント研究技術職

■専門分野　電磁波、ネットワーク、サイバーセキュリティ、ユニバーサルコミュニケーション、フロンティアサイエンス、脳情報通信、量子ICT、オープンイノベーション推進、情報システムDX等

■エントリー方法　募集要項を確認の上、「研究職・研究技術職採用サイト」からエントリーください。

https://www2.nict.go.jp/employment/researcher/index.html

《採用時期》2025年4月1日（原則）

《応募締切》2024年3月26日（火）17:00 必着

■お問い合わせ

総務部人事室人事グループ／
経営企画部　研究職採用担当
MAIL：jinji-r@ml.nict.go.jp

パーマネント総合職

■仕事内容　研究開発の推進及び研究開発成果の社会還元のため、経営企画、人事、財務、法務、広報等の組織マネジメント、研究推進・産学官・地域連携、国際連携、知的財産管理、技術移転など幅広い業務に従事します。

■応募資格　4年制大学（海外の大学を含む）以上を2025年3月に卒業・修了する見込みの方。あるいはそれらを卒業・修了した30歳以下（1994年4月1日生まれまで）の方。
※学部や専攻は問いません。

■エントリー方法　下記URLからマイナビ2025に登録後、エントリーをされた方へ順次ご案内いたします。

https://www2.nict.go.jp/employment/clerk/clerk.html

《採用時期》2025年4月1日（原則）

《応募締切》2024年3月31日(日)　必着

※マイナビにエントリーできない方は、以下までお問い合わせください。

■お問い合わせ

総務部人事室人事グループ 総合職採用担当
MAIL：jinji@ml.nict.go.jp

施設一般公開イベント

NICTオープンハウス 2024

参加費無料・事前申込制

6/28 Fri ▸▸ 6/29 Sat

開催内容につきましては3月中旬頃、
イベント公式サイトにて公開いたします。

「NICTオープンハウス2023」開催時の様子

NICT NEWS 2024 No.2 通巻504
編集発行：国立研究開発法人情報通信研究機構 広報部
発行日：令和6年（2024年）3月（隔月刊）

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1
TEL：042-327-5392　FAX：042-327-7587
E-mail：publicity@nict.go.jp
URL：https://www.nict.go.jp/
@NICT_Publicity
#NICT

ISSN 1349-3531 (Print)
ISSN 2187-4042 (Online)

NICT SEEDs
産業界、大学、地域等の技術の新たな価値の創出や課題解決にご活用いただくため、NICTのシーズを公表しています。
SEEDs集はこちら

〈再生紙を使用〉