

# 電波と光の極限「テラとナノ」を操る

永妻 忠夫

大阪大学大学院基礎工学研究科  
システム創成専攻 電子光科学領域

あらまし：

当研究室（光・量子情報科学グループ）は、平成19年度から新体制のもと、1) テラヘルツフォトニクス分野（未開の電磁波領域であるミリ波・テラヘルツ波の発生・検出技術の開発と、新しい通信・センシング技術への応用）、2) ナノフォトニクス分野（低次元光波および表面プラズモンを利用して、光波をナノ空間に閉じ込めてその伝搬を制御する技術と応用）、3) 超高速フォトニクス分野（マイクロ波・ミリ波周波数領域における光信号の変調・制御技術とその応用）、の3つの技術分野を柱として研究を進めている。新研究室の立ち上げから2年間の研究内容を中心に紹介する。

## 1. 研究内容の概要

図1は、当研究室がカバーする研究領域を、対応する電磁波の波長（周波数）で示したものである。対象とする電磁波は、電波の周波数上限である3THzを挟み込む領域で、ミリ波（30GHz～300GHz）から、テラヘルツ波（100GHz～10THz）、遠赤外線（300GHz～200THz）、近赤外線、可視光に及ぶ。特に、電波と光の境界のテラヘルツ波領域は、約150年の電磁波の開拓の歴史の中で、産業的にはほとんど利用されていなかった領域であるが、近年、国内外で研究開発が活発になってきた[1]。

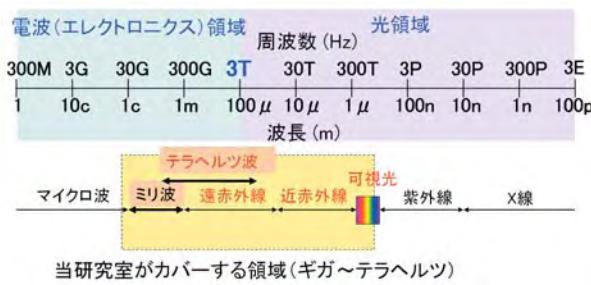


図1 対象とする研究領域

当研究室の強みは、電波、光波の双方の領域の技術を有することであり、電波（電気信号）で光波を制御したり、逆に光波で電波（電気信号）を発生、検出する技術など、いわゆる「光波と電波の融合」というアプローチ[4]得意としている。以下では、当研究室における3つの研究分野に関して最近の成果を紹介する。

## 2. テラヘルツフォトニクス分野 [1-4]

上述の光波（フォトニクス）技術と電波（高周波エレクトロニクス）技術とを融合する独自のアプローチにより、ミリ波・テラヘルツ電波を発生、検出するための基盤技術の構築と、分光センシングやイメージング計測、さらには無線通信への応用展開を行っている。光波技術を利用して周波数として100GHz～1THzまでの電波（連続波）を発生し、さらにその電波を使って、物体のイメージングや無線通信に応用している。

センシング関連では、図2に示すような電気光学センサを利用したテラヘルツ波の検出において、従来のバルク電気光学結晶の感度を一桁以上上回る、新しい材料・構造のセンサの開発を行なっている。

情報通信の分野では、図3に示すように、有線（光ファイバ）通信と無線とが伝送速度においてシームレスに繋がることが求められている。そこで当研究室では、300GHz電波を利用し、高精細映像データ伝送や大容量ストレージデータの瞬時転送などを狙った20Gbit/s級の無線の研究を進めており、現在、近距離無線でギガビット級のエラー-freeデータ伝送に成功している。図4に300GHz帯ホーンアンテナを示す。アンテナサイズ（フランジは除く）はレーザーポインタやUSBコネクタよりも小さくなる。薄膜アンテナにするとさらなる小型化が可能であり、将来、様々な機器に組み込むことも期待できる。

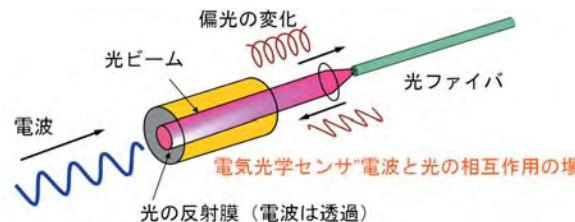


図2 光技術を利用した電界センサの概念図



図4 300GHz帯ホーンアンテナ(中央)  
左右はそれぞれレーザーポインタおよびUSBコネクタ。

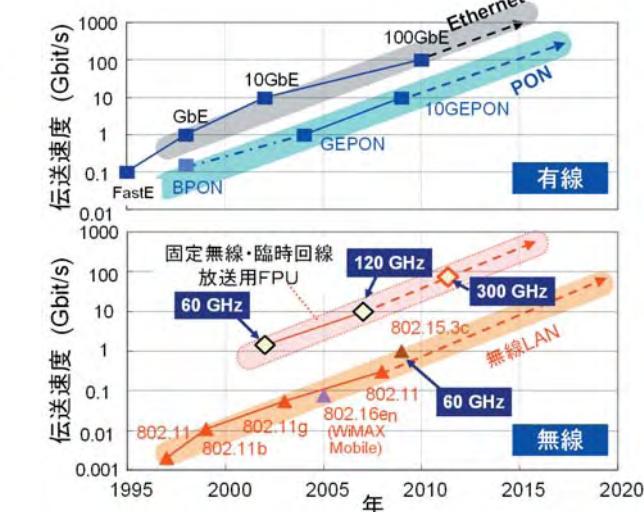


図3 通信の伝送速度の年代推移

## 3. ナノフォトニクス分野 [5-8]

通常、波長が数100nmから1μmオーダーの光波を、光の回折限界を超えたナノサイズの空間に閉じ込め、それを伝搬制御するための研究を行なっている。将来の応用としては、バイオセンサーアレイ（医療応用）、超微細なナノ光集積回路、近接場光学顕微鏡、ナノプローブ・ピンセット、超高密度光記録などが挙げられる。

最近の研究の一例として、ナノフォトニックデバイスへの光導入のためのプラズモニック光カップラを提案[7]、集束イオンビームを用いて図6に示すようなデバイスを作製して動作を実証した。このカップラは金属基板上に光の波長より十分小さな100nm程度の扇型ホールをリング状に配列する構造をもち（図6上）、紙面に垂直に入射した光エネルギーは扇型の弧によって表面プラズモンに変換され、中央部に集束される。ホール形状を円形（図6下）から非対称化し扇型とすることで、偏光方向に依存せず伝搬方向を制御でき、円形と比較して2倍以上の集束を観測した。

そのほか、関連するテーマとして熱輻射の制御技術に関する研究を行なっている[8]。

上記テーマは、周波数を低く（波長を長く）スケーリングすることで、テラヘルツ波領域にも展開できる可能性がある。

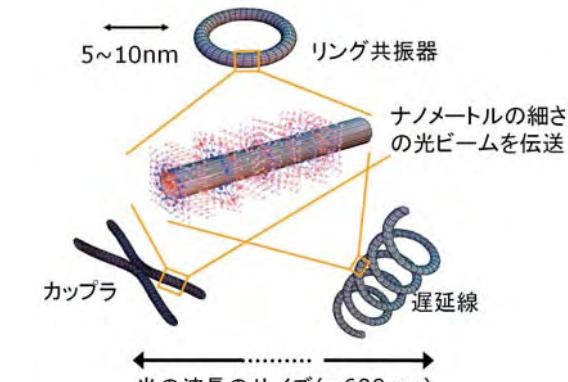
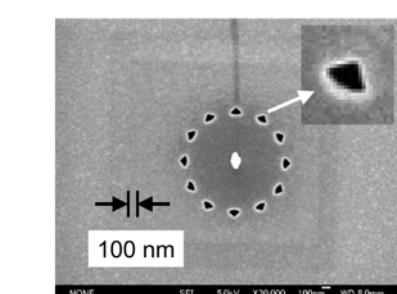


図5 低次元光波の例



100 nm

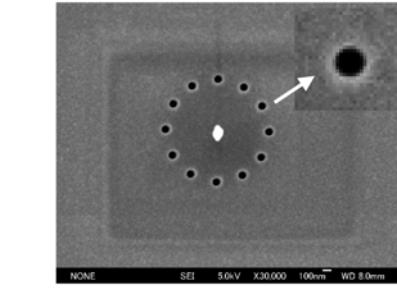


図6 プラズモニック光カップラの電子顕微鏡像：金薄膜にリング状にあけた扇型（上）および円形（下）ホール。

#### 4. 超高速フォトニクス分野 [9-11]

高速電気信号を使って光波を制御するための基礎的研究を行なっている。独自のアプローチとして、進行波型位相変調器における強誘電体結晶の分極反転領域の形状を工夫することで、新しい制御機能を有するデバイスの創出を目的としている。対象とする時間・周波数領域はピコ秒からフェムト秒の時間域、GHzからTHzにわたる周波数域である。

一例として、図7に示すような光周波数シフタを開発した。16.25GHzの電気信号によって駆動されたデバイスは、図のように、入力光から32.5GHz(16.25GHzの2倍に相当)だけ周波数がずれた光波が重畠されて出力されていることがわかる。これをフォトダイオードに入力すると32.5GHzの電気信号が得られることになる。この原理はテラヘルツ帯まで拡張が可能である。

その他、光計測器や任意信号発生器への応用を狙い、光ビームを空間上に高速にマッピングする技術の研究も行なっている[10]。

なお、本グローバルCOEプログラムにおけるIDER「先進的光電気インターフェイス開発」ユニットにおいて、上述のシーズをさらに発展させ、高周波電気信号を高感度に計測する技術の確立に取組んでいる[11]。この計測技術は、グローバルCOEプログラムにおける超高速電子デバイス、ミリ波デバイス、超高速光デバイスの研究に直接貢献するものである。

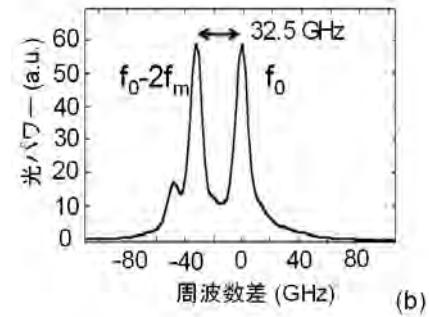
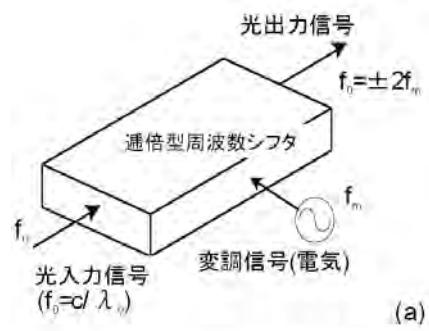


図7 適倍型光周波数シフタと実験結果の一例

#### 参考文献

- [1] 永妻忠夫 “テラヘルツテクノロジーを牽引するデバイスとシステムの動向”, 電気学会論文誌C(電子・情報・システム部門誌), Vol. 128, No. 6, pp.832-837 (2008).
- [2] 永妻忠夫, “高出力RF フォトダイオードとその応用”, 月刊オプトニクス, Vol.27, No.323., pp.122-128 (2008).
- [3] Tadao Nagatsuma, Hiroshi Ito, and Tadao Ishibashi, “High-power RF photodiodes and their applications,” Laser & Photon. Rev., Vol. 3, No. 1-2, pp.123-137 (2009).
- [4] Tadao Nagatsuma, “Radio spectral evolution with photonics,” Tech. Dig. IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP2008), PLE-1, Gold Coast, Australia, 1-3 October (2008).
- [5] Junichi Takahara, Masato Nishimori and Tadao Nagatsuma, “Efficient transmission through a plasmonic T-branch with a mesa structure in metal gap optical waveguides”, Plasmonic Nano-imaging, Nanofabrication, and Their Applications IV in SPIE Optics & Photonics, San Diego, Proceedings of SPIE 7033-33 (2008).
- [6] Junichi Takahara, “Low-dimensional optical waves and plasmonic waveguides”, META in Frontiers in Optics / OSA Fall Optics & Photonics Congress, Rochester (2008).
- [7] 一芝賢太, 高原淳一, 永妻忠夫, “結合負誘電体ナノホールにおける二次元光波の集中”, Optics & Photonics Japan 2008, 4pP4, pp.110-111(2008).
- [8] 野村泰史, 高原淳一, 永妻忠夫, “リング共振器アレイによる熱輻射の増強”, 第69回応用物理学会学術講演講演会, 4p-ZH-5(2008).
- [9] 小西孝明, 久武信太郎, 永妻忠夫, 小林哲郎, “2倍周波数シフタの設計と作製”, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE2008-150 (2009).
- [10] Shintaro Hisatake, Keiji Tada, and Tadao Nagatsuma, “Linear time-to-space mapping system using double electrooptic beam deflectors”, Optics Express, Vol. 16, Issue 26, pp.21753-21761 (2008).
- [11] Shintaro Hisatake, Akira Kaino, Tomoaki Yasuda and Tadao Nagatsuma, “Phase velocity estimation of a microstrip line in a stoichiometric periodically domain-inverted LiTaO<sub>3</sub> modulator using electro-optic sampling technique”, Advances in OptoElectronics, Vol. 2008, Article ID 752847, pp.1-6 (2008).