

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信

Vol.7, No.2

「Terahertz Science and Technology」

福井大学遠赤外領域開発研究センター特任教授
出原 敏孝

4月上旬、共同研究のために訪れた大阪大学蛋白質研究所では、研究所棟前の桜が満開で、天候にも恵まれていたので、研究所の皆さんとつかの間のお花見を楽しんだ。その週の週末、福井では足羽川の堤防に広がる桜が満開に近く、ここでも再び優雅なお花見の機会に恵まれた。その後、4月中旬の日曜日に、翌日の東京でのミーティングに出席するため、福井から直江津、越後湯沢を通る経路で上京した。この折には、桜前線は、すでに直江津にまで達していて、魚津、糸魚川あたりでは、車窓から霞のように美しい桜をいたるところで眺めることができた。日頃の多忙を一瞬忘れさせてくれる桜との出会い、この季節には、この楽しみに出会うたびに日本に住む幸せを思う。



いきなりたわいないお花見のことを書いたりして、不謹慎だと思われるかもしれない。しかし、私は、科学技術の新たな展開にしても、テラテクフォーラムの目指す産官学の連携によるテラヘルツ技術のイノベーションにしても、基本的に、これに人間が関わっている以上、多忙な中にも心の余裕を持って、楽しみの心を忘れないことが大切ではないかと思う。その中から、真の「連携」も、新たな科学技術も生まれ、育っていくのではないか。

最近のテラヘルツテクノロジーの進歩は著しく、まさに日進月歩の感がある。現在、「テラヘルツ」の代名詞とも思える程に発展を遂げた THz-TDS は、テラヘルツ分光・イメージング等、応用面への展開も図られ、テラヘルツテクノロジーの中核として、今後のますますの発展が期待されている。この技術の真髄には、Science のすばらしいアイデアがあり、THz-TDS は、これを支える光源技術の進歩とあいまって、でき上がった技術といえるであろう。テラヘルツに限らず、すぐれた技術には、基本に Science のアイデアが不可欠である。

私の関わっている高出力テラヘルツ光源 – ジャイロトロンの開発は、そのルーツをたどれば、

オーストラリアの天文学者であった Twiss が 1958 年に *Australian Journal of Physics* に発表した宇宙空間で起きる電磁波の増幅現象に関する仮説に行き当たる。この論文発表の数年後、大学院生として私の所属した研究室では、Twiss の仮説の一つ - 「プラズマ中の低エネルギー電子が引き起こす増幅現象」の実験を行い、10 デシベルを超える増幅の結果が得られ、実験室での証明実験に成功した。この成功により、グループリーダーの三谷健次、田中茂利両先生が仁科賞を受賞されたが、残念ながら、この原理は光源としての実用化には至らなかった。一方、ほぼ時を同じくして、MIT では、仮説の他の一つ - 「高速電子の相対論効果による増幅現象」の実験室での検証が行われ、X バンドのマイクロ波領域で、見事にこれに成功を納めた。増幅によって得られた出力は、100 mW のオーダーであったと記憶している。この原理(「サイクロトロンメーザー作用」と呼んでいる)の光源としての実用化は、さらに数年後にソビエト連邦、当時のゴーリキにあった応用物理学研究所でなされた。X バンドでキロワットオーダーの出力を確認した後、実験の成功を祝って、ゴーリキからボルガ河のクルーズに乗り込んで祝宴を開き、ウォッカを飲みながら、夜を徹して議論した末に所長のガポノフが装置の名称を「ジャイロトロン」と決定したそうである。すばらしい *Science* のアイデアを実用化した一例として、また、ロシアの大自然の中、クルーズ上での彼等の誇らしげな議論の様子とガポノフの最後の一声を思うと、想像するだけでもほほえましい。その後、ジャイロトロンに高次高調波動作と超伝導磁石を採用したことにより、格段の高周波化が実現し、現在では、高出力テラヘルツ光源として実用化されている。



高出力テラヘルツ光源
- Gyrotron FU

革新的な技術が *Science* のすばらしいアイデアに基づいて成し遂げられることを考えると、テラテクフォーラムの今後の活動においても、ともすれば軽んじられがちな *Science* からのサポートを大切にしなければならない。日本には、テラヘルツテクノロジーのいくつかの分野で、世界トップクラスの実績があり、これを支える *Science* の裾野も充実している。テラテクフォーラムを中心に、テラヘルツコミュニティーのオールジャパン体制を早期に整えれば、テラヘルツの分野で世界をリードすることも夢ではない。これを実現することにより、フォーラムの本来の目標も自ずと達成されるものと思う。

テラヘルツ領域のメタマテリアル

大阪大学レーザーエネルギー研究センター 萩行 正憲 (hagnyo@ile.osaka-u.ac.jp)

1. はじめに

メタマテリアルという言葉が最近よく聞くようになりましたが、何となく魅力的な言葉ですが、怪しげな感じもまたあります。メタマテリアルとは、電磁波の波長よりも十分小さな人工構造要素（「メタ原子」と呼ばれる）を並べて作った人工構造体で、有効誘電率や有効透磁率が自然界にある物質では不可能あるいは困難な値をとるように設計することも可能です¹⁾。このメタマテリアルの出現は2000年前後ですが、1960年代末に誘電率(ϵ)と透磁率(μ)が同時に負になったら何が起こるかを考えた研究者がいました。ロシアの Veselago です。図1は、2年前に Veselago が私の研究室を訪れたときの写真で、背の高い人物です(ちなみに、右側が筆者)。このような物質は、左手系媒質とも呼ばれますが、彼の結論は驚くべきもので、このような物質に光(電磁

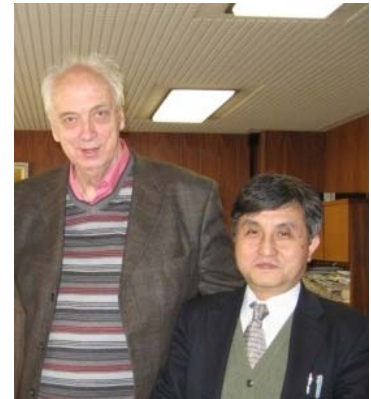


図1 伝説の人 Veselago 先生

波)が入射すると屈折は通常とは反対方向に起こり(負の屈折)、また、チェレンコフ放射やドップラー効果が通常とは逆になるというものでした。負の屈折は米国の Smith によってマイクロ波領域で2001年に実証されました。自由に ϵ と μ が設計できると、屈折率が高いのに反射損失がない物質を作ったり、 ϵ と μ を特別な分布を持つように設計し物体を覆うとあたかも存在しないように隠すことができる透明マントが実現できるなど、従来の光学の教科書を書き換えねばならなくなるということがわかってきました。

2. メタマテリアルの基本

図2は、どうやってメタマテリアルを構成するかを示したものです。金属でできた分割リング共振器(SRR)は、電磁波の磁場がリングを貫くと起電力が発生し、周回電流が流れます。この構造はLC共振器でもあるので、共鳴周波数より少し高い周波数で負の透磁率を与えるような磁気応答を示します。また、金属ワイヤーを並べたものは、気体プラズマと同じくある有効プラズマ周波数以下で負の誘電率を示します。これらを組み合わせると、ある周波数領域で ϵ も μ も負の人工物質が実現できることが先に述べ

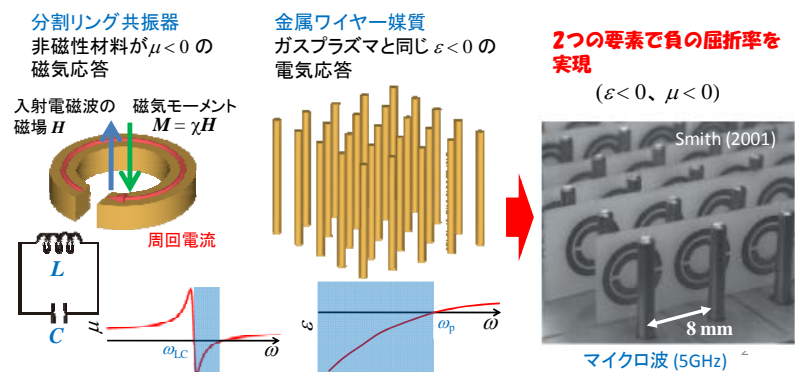


図2 メタマテリアル構成の代表例

ます。これらを組み合わせると、ある周波数領域で ϵ も μ も負の人工物質が実現できることが先に述べ

た Smith によって実験的に示されました。これらの構造要素、即ちメタ原子の設計は大きな自由度があり、目的に合わせた設計が可能です。

3. テラヘルツ領域のメタマテリアル

テラヘルツ領域は、メタマテリアルにとって様々な構造を試すにも、また、実用的な意味でもとても好都合な周波数領域です²⁾。メタ原子の大きさは数十ミクロン程度、作製精度はシングルミクロンオーダーです。この意味では、既存の技術で使えるものがたくさんあります。また、バルクな試料といっても1センチくらいで十分であり、マイクロ波と違ってメートル級の試料は不要です。半導体などを素材に使うと、アクティブなメタマテリアルも比較的簡単に作れます。

テラヘルツメタマテリアルは、通常はリソグラフィで作られますが、これは、1個の試料を作るにもフォトマスクも必要ですし、真空蒸着やリフトオフなどのやや複雑なプロセスも必要です。そこで、私たちは、新しい国産技術である超微細インクジェットプリンタ(SIJP)を使うことを思いつきました³⁾。これは、基板に金属ナノペーストインクで構造を印刷し、200°C強で熱処理するだけで、金属構造物を作ることができる技術です。図3

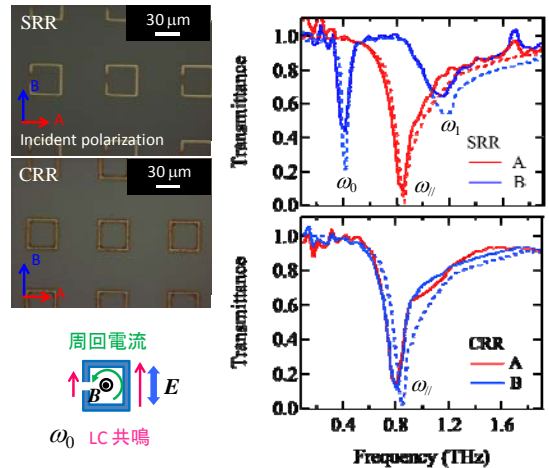


図3 超微細インクジェットプリンタでシリコン基板上に作製した平面メタマテリアル

はそうやって作った SRR と閉リング共振器(CRR)配列の写真と透過スペクトルです。SRR では0.4 THzに磁気的な共振による透過のディップが現れますが、CRR では消滅しています。現在、この SIJP を用いて、アクティブなテラヘルツ素子も作製中です。また、信州大の宮丸他はこれとは別の方法でフレキシブル基板上に SRR 配列を作製し、それを積層することで20万個にも及ぶ SRR を含む真の3次元バルクメタマテリアルを実現しています⁴⁾。

4. むすび

メタマテリアル研究は我が国でも盛んになりつつあります。学振の先導的研究開発委員会と国際高等研プロジェクトは合同で「メタマテリアルの開発と応用」研究会を定期的に開催しています。テラヘルツと同様、将来は一大研究分野になるのではないかと期待しています。皆さまのご協力をお願いいたします。

参考文献

- 1) 石原照也監修, 「メタマテリアル –最新技術と応用-」(シーエムシー出版、2007).
- 2) 萩行正憲, 宮丸文章, 応用物理 **78**, 511 (2009).
- 3) K. Takano *et al.*, Appl. Phys. Express **3**, 016701 (2010).
- 4) F. Miyamaru *et al.*, Appl. Phys. Lett. **96**, 081105 (2010).

研究室紹介

岡山大学大学院自然科学研究科(計測システム工学研究室)

(URL <http://www.sense.elec.okayama-u.ac.jp/>)

岡山は、近畿、山陽、山陰、四国に接する交通の要所として、古代より栄えてきた土地です。岡山大学は、岡山市の街中にあり、研究・教育の中心的役割を果たしています。著者の所属する計測システム工学研究室は、ふるい言い方では工学部電気電子工学科にあたる工学系の研究室で、産業化、実用化を意識した研究を進めています。現在、主な研究テーマは、

- ・高温超伝導量子干渉素子 (HTS-SQUID) を用いた高感度磁気計測システムの開発
- ・半導体ケミカルセンサデバイスの開発
- ・電気磁気化学計測システムの開発
- ・テラヘルツ波を用いたバイオセンシング技術の開発

などがあり、直流からテラヘルツまでの広いスペクトル範囲の計測を行っています。測定対象のスケールもタンパク質などのサブミクロンサイズの反応検出から船舶に用いられる鋼管などのメーターサイズの欠陥検出までに広がっています。研究室は、塚田教授・紀和(著者)のスタッフと学生は大学院・学部を合わせて27名(スタッフ2名です!!)が在籍し、そのうち9名がテラヘルツ波に関する研究を行っています。

著者は2004年より当研究室の所属となり、特にフェムト秒レーザー励起によるテラヘルツ波パルスを用いた計測システムの立ち上げ、研究を進めてきました。その中で、開発を行いました「テラヘルツ波ケミカル顕微鏡(TCM)」についてご紹介させていただきます。

TCMは、テラヘルツ波を用いて水溶液中のタンパク質相互作用を観測したいという簡単な動機より出発し開発をはじめました。TCMでは、絶縁体膜・半導体膜の2層構造からなるプレートを用います。フェムト秒レーザーを照射することで、半導体膜界面の空乏層電界によりテラヘルツ波を発生させています。絶縁体膜表面でタンパク質の反応がおこると、表面でのケミカルポテンシャルが変化しますので、それにより空乏層電界が変化し、結果としてテラヘルツ波の振幅が変化します。分光学的な検出とは異なり、テラヘルツ波と水溶液に直接の相互作用がないため、吸収の影響を受けない計測が可能です。結果として、ビオチン-アビジン結合系で5pmol/Lという検出感度を達成することが可能となりました。また、レーザー波長の空間分解能でプレート上のケミカルポテンシャル分布を可視化できることも大きな特徴です。2009年度には、岡山県内の企業数社とTCMの実用化に向け研究会を立ち上げ、実用化に向けた検討を行ってきました。2010年度からは、参加企業全社が、岡山大学内施設に拠点をもち本格的な開発に着手しています。

また、TCMの他に、フェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ波面制御素子や、分光チップなどにも着手しており、精力的にテラヘルツ波の研究を拡大していきたいと考えています。

上記テーマに限らず、テラヘルツ波に関する研究でお力になれることがありましたら、下記アドレスへ気楽にご連絡いただければと思います。



(紀和利彦, kiwa@elec.okayama-u.ac.jp)

(研究室メンバー 2010年3月25日)

テラヘルツ関連会議報告

<THz-Biz 2010: 第1回テラテクビジネスセミナー>

第1回テラテクビジネスセミナーは2010年1月22日に東京 秋葉原コンベンションホールで開催された。これまでの研究会やワークショップと違い、産業化、ヒシネス化を活性化するために今何をなすべきかについて、産官学で議論することを目的とした新機軸のセミナーとして行われた。当日は定員をオーバーする100人近くの参加者を集めたことはテラヘルツ波技術の今後の展開が注目されていることを示している。

セミナーは三部に分けて構成された。第一部ではメーカー・サプライヤーサイドから「ここまできたテラヘルツ分光」と題して、テラヘルツ分光システムの技術開発や最近の適用例や分光システムの基盤技術であるパルスレーザーの最新状況についての講演が行われた。第二部ではユーザーサイドから「テラヘルツ分光に期待すること」と題して、分光分析のためのスペクトルライブラリの充実や標準サンプル、測定方法、解析方法等の整備が求められた。そして第三部ではパネル討論として「テラヘルツ分光のさらなる発展を目指して」と題して、更なる市場拡大のために何をすべきかについてパネラー及び会場から忌憚のない意見が交わされた。また、高強度テラヘルツ波が広げる分光法の新展開やパルステラヘルツ波の特性を活かした新たな計測例が報告された。

テラヘルツ波技術の産業化が期待できる非常に有意義なセミナーだった。第二回目セミナーの開催が待たれる。

(情報通信研究機構 齋藤 伸吾)

<第57回応用物理学会関係連合講演会>

応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会は、進展めざましいテラヘルツ技術に関して分野横断的な議論の場を提供するとともに、広く情報発信を行って応用展開を促進することを目的としている。現在の会員数は約100名であり、定常的な活動は、春秋の応用物理学会講演会におけるシンポジウム企画、および研究討論会の開催である。また、本研究会はテラヘルツテクノロジーフォーラムと蜜に連携している。

さて、本研究会は、第57回応用物理学会関係連合講演会（東海大）においてシンポジウム「テラヘルツ光科学の新展開」を開催し、参加者は約200名と盛況であった。本シンポジウムは、阪大斗内教授、岡山大紀和准教授による企画で、テラヘルツ光によって先端科学をリードする応用、科学両方の専門家に「テラヘルツ光科学の新展開」という切り口で講演をいただき、テラヘルツ光の今後の展開を科学技術主導で探ることを意図している。また、産業応用以外に科学面でも、スピン系、強相関系材料から有機、高分子材料までの低エネルギー帯域の物性を解明する優れた手法としてテラヘルツ

技術は注目を集め、応用されつつあることから、前半はデバイス関連、後半は応用計測関連で次の内容の招待講演を企画した。

テラヘルツ光科学の新展開（名大川瀬氏）、テラヘルツ光の応用展開に向けて（理研緑川氏）、テラヘルツ非線形光学（京大田中氏）、高温超伝導の新規テラヘルツ科学（筑波大門脇氏）、2次元キラリ格子によるテラヘルツ偏光制御（東大五神氏）、テラヘルツ波による絵画・工芸品の非破壊調査（NICT 福永氏）、テラヘルツ波によるタンパク質の非標識検出（京大小川氏）、レーザテラヘルツ放射顕微鏡のLSI故障解析への応用（浜ホト松本氏）、いくつかの高分子フィルムの複素誘電率スペクトル（早大布施氏）、おわりに（岡大紀和氏）

（名古屋大学 川瀬 晃道）

<The 3rd International Workshop on Far-Infrared Technologies 2010>

福井大学遠赤外領域開発研究センター(以下 FIR FU)において「第3回遠赤外技術に関する国際ワークショップ(The 3rd International Workshop on Far-Infrared Technologies 2010, IW-FIRT 2010)」が2010年3月15日から17日までの3日間にわたって開催された。本ワークショップはFIR FUが1999年4月に設立されて10年が経過したのを記念して、FIR FUが企画、主催（本フォーラムが協賛）して開催されるものである。今回が3回目であるが、第1回目は1999年にFIR FU設立を祝う行事として開催され、第2回目は2002年に福井大学創立50周年を記念した国際コンGRESS(Fukui University International Congress)のイベントの一つとして開催されている。

ワークショップでは、Gyrotronをはじめとする遠赤外・テラヘルツ領域の高出力光源とその応用に焦点を当て、次のような話題に関して、招待講演27件（うち11件が海外からの招待講演）と一般講演22件（ポスター発表）が行われた。

- 1) 遠赤外領域の高出力光源の開発
- 2) 高出力テラヘルツ技術
- 3) テラヘルツ分光
- 4) 遠赤外領域の磁気共鳴現象
- 5) 遠赤外高出力光源を用いた物質加工
- 6) その他、遠赤外領域の科学技術.

THz帯発振 Gyrotron の技術開発とその応用、高強度フェムト秒レーザー励起による高ピークパワー THz波発生、THz帯メタマテリアル、THz分光計測とその産業応用など、講演内容は多岐に渡り、各セッションで活発な議論が展開された。現在進行形で展開される遠赤外・テラヘルツ領域の研究開発の現状を肌で感じることができるワークショップであったと思う。ワークショップ最終日の午後には、現存する日本最古の城（天守）である「丸岡城」と「越前竹人形の里」へのエクスカーションも実施された（福井観光コンベンション協会の後援による）。なお近日中にワークショップの論文集（Proceedings）が刊行される予定である（刊行はFIR FUのWebページ <http://fir.u-fukui.ac.jp/> にて案内予定）。

（福井大学 谷 正彦）

国内・国際会議予定

<2010 年度総会ならびに第 8 回講演会>

日時：2010 年 6 月 18 日（金） 午後 1 時～4 時 30 分

場所：東京大学 数理科学研究科棟 大講義室(駒場Iキャンパス)

参加費：会員 無料、非会員 1000 円、学生 500 円

定員：80 名

<プログラム>

(1) 総会 (午後 1 時から)

1. 2009 年度事業報告・決算に関する件
2. 組織・規約の改正に関する件
3. 2010 年度事業計画・予算に関する件
4. その他

(2) 講演会 (午後 2 時 30 分から)

- ・ご挨拶 テラヘルツテクノロジーフォーラム 会長 阪井 清美
- ・「総務省における ICT 研究開発施策とテラヘルツ技術への期待」 総務省 山内 智生
- ・「テラヘルツ波イノベーション」 東京大学 教授 小宮山 進
- ・「テラヘルツ波の産業応用」 米国レンセラー工科大学 教授 X.-C. Zhang

● 35th International Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves (IRMMW-THz 2010)

September 5-10, 2010, Rome, Italy

<http://www.irmmw-thz2010.org/>

● 第3回日韓ワークショップ

韓国での開催を予定しております。

● EOS Annual Meeting 2010 (including TOM 2: Terahertz -Science and Technology)

October 26- 29, 2010, Paris, France

<http://www.myeos.org/events/eosam2010>

● OTST 2011(International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2011)

March 13 - 17, 2011, Santa Barbara, CA, USA

<http://otst2011.itst.ucsb.edu/home.html>

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 Vol.7 No.2 400 部 無料

発行日 2010 年 5 月 31 日

企画・編集 田中 耕一郎 (京都大学大学院理学研究科/物質-細胞統合システム拠点)

電子メール: kochan@scphys.kyoto-u.ac.jp

発行 テラヘルツテクノロジーフォーラム事務局

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

京都大学大学院理学研究科 物理学第一教室 光物性研究室

Tel /Fax 075-753-3757

E-mail: teratech@terahertzjapan.com

<http://www.terahertzjapan.com>