



<研究紹介・自己紹介>

研究項目 A01:公募研究

「フェムト秒電子ビームとテラヘルツ波メタマテリアルを用いた逆チェレンコフ放射の研究」

研究代表者 菅 晃一 (大阪大学)

公募研究 A01「フェムト秒電子ビームとテラヘルツ波メタマテリアルを用いた逆チェレンコフ放射の研究」の研究代表者の菅晃一 (大阪大学) です。この度は、電子ビームを用いたテラヘルツ波生成および逆チェレンコフ放射の研究として参加させていただき、深く感謝いたします。これまで研究してきた事と今後の電磁メタマテリアルにおける抱負について、簡単に自己紹介をさせていただきます。

私は、2004年に大阪大学工学部電子・情報・エネルギー工学科原子力工学専攻の吉田陽一先生の研究室に配属され、パルス電子ビーム加速器の開発、ビーム特性の計測、電子ビーム照射と過渡光吸収測定を利用した放射線化学初期過程の研究 (パルスラジオリシス) など、主に装置開発の研究をしてきました。私が研究室に配属された年は、たまたま吉田研究室が主に管理する全長 5 m 程度の小型加速器を納入する年で、同時に、加速器部品を開発する住友重機械に勤務していた楊金峰先生が研究室へ転勤となり、直接の指導を頂きました。私の修了した原子力工学専攻 (現在は、合併などにより環境・エネルギー工学科) は、原子炉、放射線などがキーワードとなるわけですが、放射線の一種である電子ビームを発生する加速器を研究することになりました。納入された加速器は、電子ビーム発生部が従来の加速器とは大きく異なり、ピコ秒レーザーの光電効果による電子を利用するタイプの電子銃を備えており、ピコ秒の電子ビームを簡単に得ることができる加速器でした。また、電子ビームは荷電粒子のため磁場におけるローレンツ力を利用した磁気パルス圧縮器 (レーザー分野におけるチャープパルス圧縮のような装置) を用いて、これまでにフェムト秒の電子ビーム生成と利用を行ってきました。研究室では、楊先生の直接の指導のもと、加速器の組み立てから、ビーム物理、光学、放射線化学、電気回路、自動計測を教わりました。2006年に、修士論文では、フェムト秒電子ビームの発生シミュレーション・計測を行いました。2009年に、博士論文では、「フェムト秒・アト秒電子線パルス発生に関する研究」のタイトルで、大阪大学工学研究



科を修了しました。

博士課程修了後は、同じ研究室で博士研究員となり、強度変調放射線治療に基づく加速器のがん治療への応用、フェムト秒・アト秒時間分解能パルスラジオリシス開発についての研究を行ってきました。そのような研究の中で、超短パルス電子ビームパルス幅診断方法の開発が必要だということで、従来の電子ビームが空気中で発生するチェレンコフ光のストリークカメラ（光から光電子に変換し時間掃引する高速光カメラ）で測定するよりも、時間分解能を向上するために、電子ビームの放射するテラヘルツスペクトル計測の研究がスタートしました。その後、マイケルソン干渉計を用いたテラヘルツ分光装置の構築、誘電体管と電子ビームを用いたテラヘルツ発生の研究を行っていたところ、ある研究会で萩行先生の講演をお聞きし、メタマテリアルを知ることとなりました。しかし、メタマテリアルという物質を知らなかったもので、当然荷電粒子の逆ドップラー・逆チェレンコフ放射という現象についても知りませんでした。電子ビームを用いたテラヘルツ関連の研究はそれなりに多いのですが、未実証の逆ドップラー・逆チェレンコフ放射の実験的研究についてはほとんど例がなく、未実証の現象を研究したいという思いから、今回の公募研究に応募させていただくこととなりました。

最後に、私の電磁メタマテリアルにおける抱負ですが、これまでのバックグラウンドである加速器・電子ビームを活かして、逆ドップラー・逆チェレンコフ放射の実証だけではなく、メタマテリアルと電子ビームの交わる場所に何かあれば、電磁波領域に限らず光領域の先生方とも共同研究も展開させていただければ、と思っています。私自身は、メタマテリアルの試料設計・製作については素人で、管理している微細加工装置もありません。そのため、大変恐縮ですが、時には試料等の相談をお願いするときもあるかと思えます。以上、自己紹介と抱負ですが、今後ともご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。



＜研究紹介・自己紹介＞

研究項目 A01: 計画研究イ

「構造共鳴を利用したテラヘルツ波メタマテリアルの作製と機能」

研究分担者 永井 正也 (大阪大学)

超高速分光、光物性が専門の私がなぜメタマテリアルに興味を持ったかを述べるために、これまでの研究内容も含めた自己紹介をさせていただきます。私は石川県金沢市に生まれ、その後上京して東京大学大学院工学系研究科の五神真先生の研究室で博士号を取得しました。私が学生の頃はちょうどチタンサファイヤレーザーが広く普及した時期です。当時は製品として出回っていなかった自作の再生増幅器を研究室内で引き継ぎ、修士課程のときに改良を重ねてきました。そして光パラメトリック増幅器も自作し、中赤外領域の光学応答を調べることで半導体の強励起下での高密度光励起キャリアのダイナミクスを研究していました。

2001年秋に京都大学に赴任後は低周波領域の波長変換技術の展開としてテラヘルツ領域の発生および分光を行ってきました。テラヘルツ領域は光と電波の中間的領域で技術的に未開拓です。そこで私が得意としている超短光パルス技術を駆使することで、新しい分光装置の開拓を行い、様々な物質系のテラヘルツ応答を調べてきました。このときに金属の周期構造もまた測定対象としてそのテラヘルツ応答を調べてきました [1,2]。2007年からは JST さきがけプログラムがスタートしました。そこでは誘電体の光整流過程を用いた高強度 THz パルス発生技術を確立させ、それを用いて電子、格子、分子、さらにはスピン系を制御する試みを行ってきました。

2010年より大阪大学大学院基礎工学研究科に異動し、新しい研究方針の再考を行いました。先にも述べたとおり 1990年にチタンサファイヤレーザーのモード同期技術が確立して以来、超高速通信や光化学反応の促進など新しい時間領域、周波数領域で動作する技術開発が一気に加速しました。私も同じ挑戦を学生時代から一貫して行ってきました。ところが 20年たった現在では産業応用として普及したのはレーザー加工のみで、他の応用での産業化にはまだまだ時間が必要です。したがってピコ秒、フェムト秒の時間スケールで簡便に動作し広く普及できるデバイスの実現には根本的に新しいアイデアが必要ではないかと思うようになりました。そこで私は光パルスではなくピコ秒電場パルスでの物

質操作が重要ではないかと考えました。これまでの光パルスは電場振幅が何サイクルにも渡っており、励起状態を介して多段にわたるピコ秒のエネルギーの流れを議論する必要がありました。しかし電場のサイクル数を極限まで小さくしてピコ秒の時間で電場が持続するパルスを用いれば、電場でイオンや分子の配向をシンプルに駆動できるのではないかと考えました。現在大阪大学ではMg:LiNbO₃結晶と2011年5月に移設した600μJのチタンサファイヤ増幅器を用いて高強度のピコ秒電場パルスの発生を開発しております。図1は当研究室で行っている電場パルスを示します。光サンプリング技術を用いてパルス電場振幅を測定しています。>380kV/cmの電場振幅を持つピコ秒電場パルスを実現しています。この電場強度は他の研究グループと比べると見劣りはしますが、励起光のパルス幅をわざと200fsと長くすることで、光整流過程を妨げる誘導ラマン散乱を抑制することで、0.2%を超える光-電場パルス変換を実現しています。この電場心腹測定には同じパルス幅の光サンプリング光を用いており、これにともなう波形の歪みを考慮すると>500kV/cmを超える電場強度を実現しています。

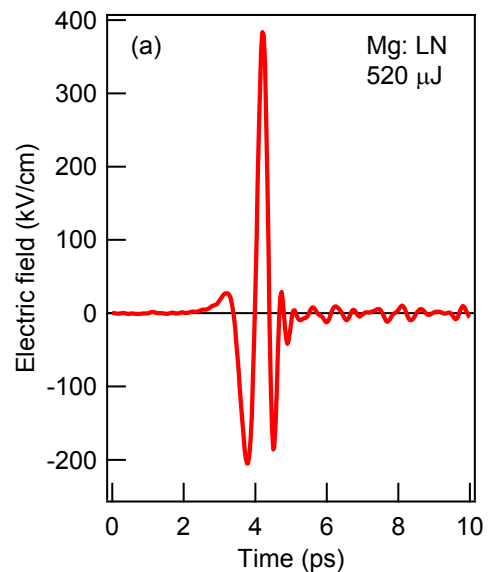


図1：誘電体中の光整流過程を用いて発生した高強度ピコ秒電場パルスの実時間波形

このようなピコ秒電場パルスを物質に作用させる際に、メタマテリアルが重要な意味を持つと考えます。テラヘルツ領域には物質にとって多くの重要な素励起が存在します。しかし物質にとって重要なピコ秒の運動ほど外部からアクセスしにくく、光学許容な応答は限定的です。したがって物質にとって重要な励起だけをピコ秒電場パルスでいかに選択的に効率よく相互作用できるかが鍵を握ります。この役割を担うのが金属の周期構造、すなわちメタマテリアルであると考えております。現在は高強度ピコ秒電場パルスの位相を操作す

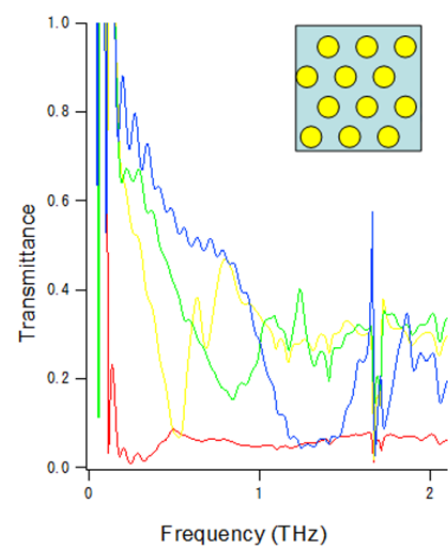


図2：メタルディスクアレイを用いたバンドカットフィルタの特性スペクトル



るためのメタマテリアル構造（図2）を構築し、ハーフサイクルに近いピコ秒電場パルスの実現を目指しています。そして金属周期構造を持つ非線形媒質（まずは半導体）を測定対象として非線形 THz 応答を観測する準備を行っています。

[1] Y. Minowa, et al. "Evaluation of effective electric permittivity and magnetic permeability in metamaterial slabs by terahertz time-domain spectroscopy", *Optics Express*, 16, (7), 4785-4796 (2008).

[2] Y. Minowa et al. "Extremely thin metamaterial as slab waveguide at terahertz frequencies", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1,(2) 441-449 (2011).



＜研究紹介・自己紹介＞

研究項目 A01: 計画研究ウ

「構造共鳴を利用したマイクロ波の偏光及び伝播制御」

研究分担者 酒井 道(京都大学)

気体プラズマを導入した動的メタマテリアル

研究項目 A01: 計画研究ウの「構造共鳴を利用したマイクロ波の偏光及び伝搬制御」において、研究分担者を務めさせていただいております、酒井道と申します。

私は、京都大学工学部電気系学科に入学した後、大学院修了まで故板谷良平先生と八坂保能先生（現・神戸大学教授）の薫陶を受けました。当時は核融合プラズマの基礎研究をまだ大学の研究室でも盛んに行えた時代であり、そこでプラズマ物理と、高周波・マイクロ波によるプラズマ生成・制御法を学びました。以後、現在に至るまでプラズマと電磁波の関わりに携わっていることを考えると、大変貴重な第一歩であったと痛感します。すなわち、プラズマ物理の独特かつ難解な世界（極めて多くの波動現象があります）と、高周波の扱いに対する第六感に触れることができました。

その後、私は、工学部出身であるからには現場に出たい、という、博士後期課程出身者としては少し特異な(?) 志望を持って、電機メーカーに8年間ほど在籍することになります。この間、薄膜プロセスやスイッチングデバイスとしてのプラズマ技術を担当することとなりますが、ここでも高周波をツールとして扱うことから逃れられませんでした。また、民間メーカーで研究所から生産ラインに至るまで、様々な段階の企業活動に参加できたことは、私の中にある貴重な資産と思っております。

企業での研究開発活動の後、京都大学工学研究科電子工学専攻の橘邦英先生の下で教員生活を始めました。ここで、大気圧プラズマ（図1参照）とマイクロプラズマ（mm以下の微小なプラズマ）という新たな研究課題に対して取り組み、プラズマの持つ誘電性に着目することになります。もちろん、依然として、プラズマの産業応用としては、主に薄膜成長やドライエッチングといった気相中反応や気相・固相界面反応の利用が盛んに行われていますし、また古くからの蛍光灯あるいは最近のプラズマテレビでみられるような発光性の利用も重要な応用分野です。私は、このようなプラズマ応用に加えて、新たにプラズ

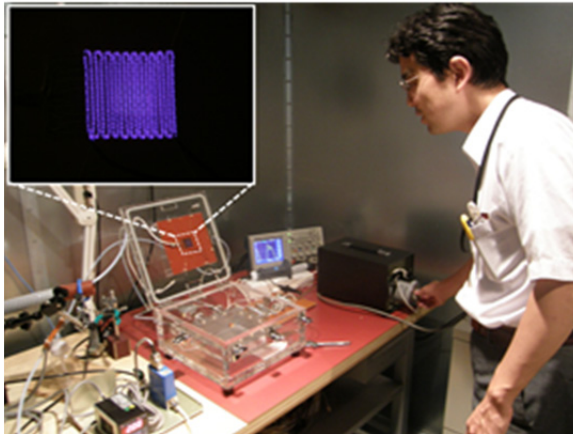


図1. 筆者が独自に開発した手法による大気圧プラズマ発生の様子。“ファブリック”型電極という構造を用いると、比較的簡単に大気中で大気圧プラズマを1次元～3次元形状で得ることができる。協力企業により、表面改質用の生産装置として実用化されている。

マの電気的な特性に着目した研究を進めました。すなわち、荷電粒子を含むことで生じる導電性、より広い意味では誘電性に着目すると、プラズマは他の物質状態とは異なる性質を示します。例えば、プラズマはマイクロ波帯で正から負の値にわたって幅広い比誘電率値を示しますし、時間的な可変性も備えています。また、プラズマ生成電力や放電気体圧力を変えることで、誘電率値を複素平面上で制御することができます。このような性質を、メタマテリアルという概念的かつツールの要素と組み合わせることで、高機能性を発現する素地があると考えました。そして、従来のメタマテリアル構造にプラズマを組み合わせることで生じる特質について、“プラズマ・メタマテリアル”として提案してきたわけですね^[1]。私は、ここでもやはり、電磁波・高周波・マイクロ波と、長い長いお付き合いを続けることになりそうです。

<研究紹介>

プラズマ・メタマテリアルの様々な可能性・応用性を示すために、我々はいくつかの点で、負の屈折率状態の実現の確認や擬似表面プラズモン現象への動的性質の付与、プラズマ・メタマテリアルが示す強い非線形性の理論予測等の研究を行ってきています。ここでは、図2を用いて、擬似表面プラズモンに関する研究内容についてご紹介します。擬似表面プラズモンとは、金属板へ周期的な穴を開けることで、ある特定の周波数では板面内の開口率に関わらずほぼ100%の電磁波が透過するという現象を理解するために提唱された考え方であり、本新学術領域においても、研究計画Iのグループにおいて精力的に研究されています。すなわち、周期的な穴開き構造を持つ板は、周期長より十分長い波長の電磁波に対しては一種の負の誘電率を示す層と言え、特異な巨視的性質を示すという意味でメタマテリアルの範疇にあるとみなせます。我々は、この穴の

中に微小なプラズマを生成することで、ミリ波帯でこの巨視的誘電率を可変に制御することができることを実験・理論の両面で示しました^[2]。

ところで、図2の構造は、別の見方としては、光領域での表面プラズモンと同様の現象の発現を通して、メタマテリアルの概念の下に、巨視的には“プラズマ”とみなせる構造を元々示している、とも言えます。このように、メタマテリアルの概念に後押しされる形で新たな“プラズマ”形態を実現することも、私が目指している研究の流れに沿ったものです。そして、実際のプラズマ生成とともに、効果が入り組んだ形で機能性を発揮することができている好例と言えます。

また、プラズマ・メタマテリアル研究全般の中では、メタマテリアルへの動的性質（可変性）を付加することで生じる機能性が明らかとなってきています。構造（空間）自体に潜む創造性という軸に対して、時間軸への制御性をどのように実現してどのように応用するか、という観点を採用して、研究領域を広げていこうとしております。

以上のように、本研究内容は、1つのストーリーに沿って筋立てられる内容というよりは、多分に多面的な要素を含んでいます。先に述べましたように、プラズマ・メタマテリアル研究は我々が世界に先んじて提案した概念と言えますが、最近では欧米およびアジアにおいて理論および実験研究が多く報告されるようになってきています。我々は、その先頭を切って新たな研究展開を図るべく、学術の進展と産業応用への提案の両面で研究を進めていきます。

[参考文献]

- [1] 酒井道、橘邦英、「マイクロプラズマによる電磁波メタマテリアル」、応用物理、78巻、pp. 437-441 (2009)。
- [2] D.-S. Lee, O. Sakai and K. Tachibana, Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009), 062004. 本論文は、第33回（2011年度）応用物理学会優秀論文賞を受賞しました。

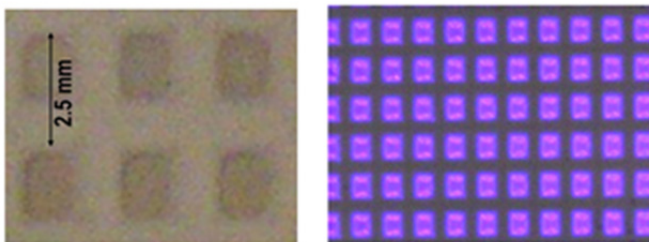


図2. プラズマによる動的なメタマテリアル構造の一例。擬似表面プラズモン構造（拡大図、左）と、穴内部へ微小プラズマを生成したときの様子（右）。