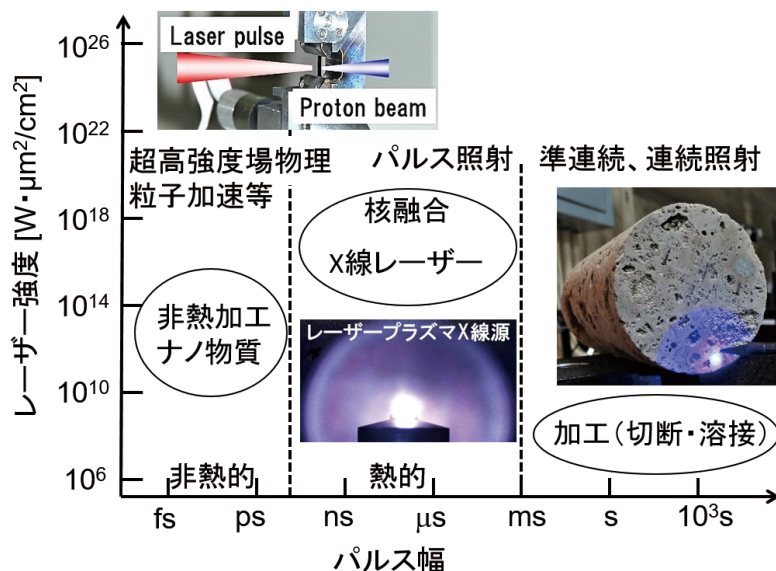


CONTENTS

研究を楽しむ
～高強度レーザー科学のこれまでとこれから～
第43回赤外ミリ波とテラヘルツ波に関する
国際会議 (IRMMW-THz 2018) 参加報告

LASER CROSS

ISSN 0914-9805



【表紙図】照射レーザーの強度とパルス幅の中のユニークな相互作用

研究を楽しむ ～高強度レーザー科学のこれまでとこれから～

特別研究員 大道博行

◆はじめに

学びて時にこれを習う、また喜ばしからずや。朋あり遠方より来る、また樂しからずや。人知らずして恨みず、また君子ならずや。有名な論語の一節である。学んだことを実践に移し、その中からさらに学びを深める、高いレベルの研究者との議論と協働、世間的な評価にとらわれることなく、ひたすら研究に打ち込むといったことを意味すると思っているが、研究者の末席にいる者としてしみじみとした気持ちにさせられる。私にとって研究における最大の喜びは、たくさんの苦難の中でほんのたまにはあるが、感動するほどの美しい結果に出会うことである。筆者は阪大の学生の時レーザー研究に入り、その後研究の中身はいろいろだったが、レーザーは常にキーワードであった。ここではレーザー総研の一員として、今後進めていく

い研究について、これまでの経緯を紹介しつつ述べてゆく。

◆レーザー光と物質の作り出す風景：

レーザー強度 $> 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 、
パルス幅フェムト秒～ナノ秒の世界

表紙図は、横軸にレーザー光の時間幅、縦軸に物質にレーザー光を照射するときの光の強さ(単位面積当たりのパワー)を表し、図中にそれぞれの領域で起こるユニークな現象を示したものである。筆者は阪大、原子力機構において高強度場科学研究に取り組んできた。これは図の中で、時間幅 fs(フェムト秒)、ps(ピコ秒)、ns(ナノ秒)、レーザー強度に波長の二乗をかけた値が $10^{16} \text{ W} \mu\text{m}^2/\text{cm}^2$ より高いところである。この領域では、高速電子流発生、イオン加速の研究[1]を行った。また超高強度レーザーを線状に集光して細長

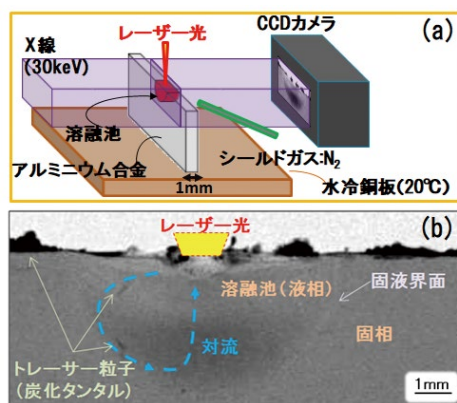
いプラズマを作り、軟X線レーザーの発振を目指した研究[2]や小型レーザーを用いたレーザープラズマX線源の研究[3]も行った。X線フィルムが焦げたのではと思うほどの軟X線レーザーの発振線、細いプロトンビームが乾板にくっきりととらえられた時の感動は忘れられない。

◆レーザー技術の廃炉技術への適用：

レーザー強度 10^4 – 10^8 W/cm²、
パルス幅ミリ秒～連続光の世界

2009年からレーザー技術を廃炉に用いることを目的に、切断等の基礎的研究に取り組んだ。この一環で放射光施設を用いたレーザーによる金属の熔融現象のリアルタイム観測を行った。出力 300 W のファイバーレーザーを大型放射光施設 SPring-8 に持ち込み、図 1(a) に示す実験配置で熔融池の観察を系統的に行った。図 1(b) にレーザーをアルミニウムの板に照射したときのX線によるリアルタイムの透視画像を示す。レーザー照射前に試料表面に塗布した粉末が、熔融金属中の対流に乗り回っている様子が写っている。また熔融部分と固体の境界が明瞭に見えている。単色高強度X線により熔融池のリアルタイム観測が可能になった[4]。この観測手法により、切断現象の解明に向けた研究も期待される。また、X線回折を併用することにより、このような振る舞いが冷却時の相形成に影響を与え、最終的には残留応力や気泡に起因する溶接欠陥形成に影響を与えることがわかった。

さて2011年3月11日に起こった東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故は、その後の日本の方向性をも大きく変える大災害、大事故であった。このような中、原子力機構は福島事故と復興への取り組みを当

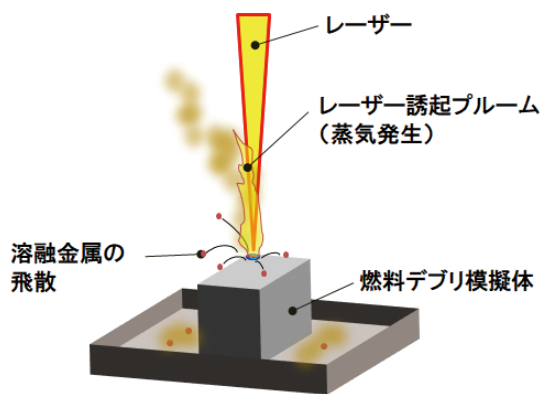


【図1】レーザーは直径 1 mm の大きさに集光され、写真上から 7 秒間照射される。シールドガスとして窒素ガスをレーザー照射部に噴射している

初から担ってきた。その一環として燃料デブリ取り出しに向けた取り組みがある。レーザー切断工法は照射部に高いパワーを集中できるところから、他の熱的工法と比較して対象物の切断幅を数mmと極小にできる。また粉塵の発生量は、切断幅が小さいのでその分小さくなる[5]。一方、その集中性により、図2に示す蒸気が過冷却の下で、凝集してサブマイクロメートルの微粒子が発生する。このサイズの微粒子は人体に取りこまれやすく、特にアルファ線を放出する核物質を含む微粒子の閉じ込め・回収は重要である。筆者は本年9月より東大、原子力機構の研究者とともにレーザー照射に伴う微粒子発生機構の解明に取り組むことになった。

◆紫外線の金属ナトリウムの特異な透過現象の 物理機構の解明：低強度光と物質の相互作用

さて次は強度の小さい領域での相互作用の研究である。紫外線のように波長が短い光では金属中の電子の集団が光電界の変化に追いつかなくなり、反射から侵入に移行する。この境界の波長をプラズマ波長と呼ぶ。侵入した光は金属中の自由電子を振動させながら進み、かつその電子が周囲の電子や格子振動にエネルギーを与え、その結果、光は通常金属中で大きな減衰を受ける。この現象を調べるため、筆者らはナトリウム専用グローブボックス内でフッ化マグネシウム窓材と金属容器でNaを挟み込むことで化学的に安定な分厚い試料の作成に成功し透過率の正確な計測を可能にした(図3)。その結果、驚くことに波長115～170 nmの光が厚さ数mmのナトリウムを透過することが明らかになった[6]。これまで考えられていた厚さの千倍もの厚さである。この研究は、現在も原子力機構、豊田理化

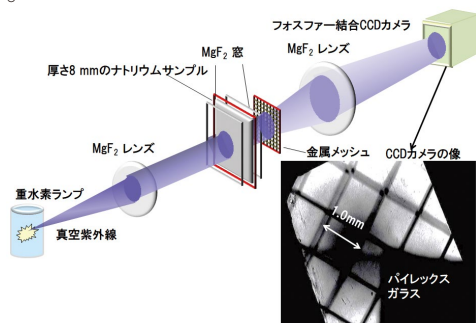


【図2】レーザー照射による金属蒸気発生の様式図。この蒸気が凝集することにより微粒子が発生する。また溶融金属の部分からも微粒子は発生する

学研究所等との協力の下継続している。何故ナトリウムでは、このように高い透過率が得られるのか、そのメカニズムの解明を目指している。

◆まとめ

光と物質の相互作用は実に多様で奥深い。その一端に触れ続けることができるのは、研究を志す者としてこれに優る喜びはない。縁あって取り組むことになった研究を、仲間と一緒に心行くまで楽しみたいと願っている。



【図3】厚さ8 mmの金属ナトリウムを透過した紫外線の照明による金属メッシュ像。メッシュに重ねて配置した厚さ1 mmのガラス板は、この波長域の紫外線は透過しないので黒い影になる

参考文献

- [1] H. Daido, M. Nishiuchi, A. S. Pirozhkov, "Review of laser driven ion sources and their applications," *Rep. Prog. Phys.* **75**, 05640 (2012)
- [2] H. Daido, "Review of soft x-ray laser development," *Rep. Prog. Phys.* **65**, 1513-1576 (2002).
- [3] 大道博行 レーザープラズマX線源 レーザー研究 **27**, No. 1, 3-8 (1999).
- [4] 山田知典, 山下晋, 杉原健太, 村松壽晴, 5. レーザー加工のシミュレーション、プラズマ核融合学会誌 Vol. **89**, No. 7, pp. 500-506 (2013); H. Daido et al., Real-Time Observation of laser-Heated Metals with High Brightness Monochromatic X-Ray Techniques at Present and Their Future Prospects, 13th International Conference on X-Ray lasers 2012.
- [5] 大道博行、レーザー加工技術(1) 原子力分野への新展開、電気学会誌**136**、No. 7、pp. 422-425 (2016).
- [6] H. Daido et al., Demonstration of Partially Transparent Thick Metallic Sodium in the Vacuum Ultraviolet Spectral Range, *Opt. Express*, **21**, issue 23, 2013, pp.28182-28188.

REPORT

第43回 赤外ミリ波とテラヘルツ波に関する国際会議 (IRMMW-THz 2018) 参加報告

■IRMMW-THz2018が名古屋で開催

2018年9月9～14日、名古屋国際会議場にて第43回赤外ミリ波とテラヘルツ波に関する国際会議(The 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2018)が開催された。本会議は赤外線～THz波～ミリ波(波長0.75 μ m～1 mm、周波数30 GHz～400 THz)の電磁波領域に関する研究、およびそれらの応用について議論する場として、アジア、ヨーロッパ、米国の輪番で毎年開催されている。研究トピックはレーザー駆動型THz光源、量子カスケードレーザー、自由電子レーザーとシンクロトロン放射といった光発生に関するものから、イメージングとリモートセンシング、超高速測定、レーダーなどの計測関連、地球環境科学、医学、セキュリティ・検査技術への応用など、合わせて18のセクションにカテゴライズされ、期間中には世界各国から約840名の研究者が集い720件あまりの研究発表が行

レーザーエネルギー研究チーム 李 大治

われた。筆者は主にTHz放射源とその応用に関するセクションに参加した。以下にTHz技術に関する最新の研究成果について報告する。

■小型テラヘルツ加速器

電子加速および電子バンチの操作にTHz放射を利用する技術は、この10年でTHz駆動の電子銃やLINAC(直線加速器)、広範囲のビームマニピュレーターの実用化が可能なレベルまで進んでいる。ハンブルク大学(独)、ドイツ電子シンクロトロン(DESY)自由電子レーザー科学センター(CFEL)の研究グループは、超短電子バンチの6次元位相空間上で複数の高電界加速を行うことができる分割型テラヘルツ電子加速器およびマニピュレーター(STEAM)を開発した。このデバイスは数マイクロジュール、シングルサイクル、0.3 THzのパルスにより駆動し、>30 keVのTHz加速、分解能<10 fsのストリーキング、<2 kT/m強度の集束、約100 fsのパルス圧縮という優れた性能を持つことが

実証された。さらにこれらの動作モードはリアルタイムで切り替えることが可能である。STEAMにより、今後THzベースの電子加速器、マニピュレーターおよび診断ツールが飛躍的に発展するものと期待される。

■アクティブテラヘルツデバイス

次世代のアクティブ光デバイスおよびシステムを創出するための有望な技術の一つに、THz波の伝播特性の制御がある。これまでに提案されたさまざまな手法の中で、光放射を利用する技術は、例えば半導体ベースのデバイスにおいて光キャリアの直接生成が可能となるため、非常に有望とされている。これに関しユタ大学(米)の研究グループは、メチルアンモニウム鉛ヨウ化物(MAPbI₃)ペロブスカイトの2次元薄膜で被覆したシリコンウェハーを用い、光励起によりそのTHz波透過特性を広帯域にわたって完全に消滅させることに成功した。高フルエンスの超高速レーザーを用いた際に同様の現象が起こることは以前から確認されていたが、驚くべきことにこの材料では市販のハロゲンランプにより制御可能であることが実証された。さらに2Dペロブスカイトは、電氣的に接続された層の数を変えることによりバンドギャップを調整することも可能である。

■情報メタマテリアルとメタ表面

東南大学(中)の研究グループから、符号化やデジタル化、フィールドプログラムが可能なメタマテリアル、およびメタ表面に関する研究報告があった。メタマテリアルは単位粒子がサブ波長スケールであるため、その特性は従来、媒質の特性パラメーターを用いて記述されてきた。この場合媒質の連続的な特性により、メタマテリアルは“アナログ”マテリアルとして動作する。これに対し、近年メタマテリアル、あるいはメタ表面のデジタルコード化の概念が提案されている。この概念では、メタマテリアルは例えば180°の位相差を1ビット(0,1)、あるいは90°の位相差を2ビット



【写真】発表会場の様子

(00,01,10,11)とするデジタルコード粒子として特徴づけられる。デジタルコードシークエンスの変更により電磁波を操作することが可能であることは実証されている。コーディング粒子は物理的世界とデジタル世界をリンクし、電磁波をリアルタイムで制御できるデジタルメタマテリアルやフィールドプログラマブルメタマテリアルへと発展する技術である。さらにこの技術を情報科学に導入することにより、シャノンエントロピーやコンボリューション理論による電磁波の完全な制御を実現できる。

■ナノテラヘルツテクノロジー

レーゲンスブルク大学(独)の研究グループは、半導体ナノワイヤー(NWs)を用いたTHz受信器、変調器を開発した。時間領域分光におけるTHz検出には、一般的に低コストで操作が容易なイオンビーム改質半導体ベースの光伝導(PC)スイッチが用いられるが、高密度化や電力消費の低減にはデバイスのナノスケール化が必要となる。半導体ナノワイヤーは、高いキャリア移動度とピコ秒の寿命、および直接バンドギャップを持つことから、THz PC受信器の素子として理想的な材料である。講演では、NWが高いキャリア移動度(～1260 cm² V⁻¹s⁻¹)と低い暗電流(～10 pA)を示し、また単一のNWを用いて作製されたTHz PC受信器が優れた感度と高いS/N比(40)を持つことが実証された。また彼らは、GaAs半導体ナノワイヤーをベースとする超高速アクティブTHz偏光変調器を開発した。光ポンプ・THzプローブ分光法を利用し、励起ビームの偏光を変化させることで、変調深度 -8 dB、スイッチング時間 <5 psの超高速THz変調が可能である。また、この変調器は消光13%以上、ダイナミックレンジ -9 dBで動作し、グラフェンやメタマテリアルベースのマイクロ秒スイッチ変調器と同等、かつ光学的なスイッチングが可能なカーボンナノチューブTHz偏光子を上回る性能を持つことが示された。さらに変調可能な帯域幅は0.1～0.4 THzと幅広いことも明らかにされた。このように大きな変調深度、広い変調帯域幅、ピコ秒の時間分解能を併せ持つTHz変調器は世界初のものであり、超高速THz通信への応用が期待されるさまざまなTHzデバイスの中でも最も有力な候補と考えられる。

■次回開催予定

今回のIRMMW-THzは2019年9月1～6日、パリ(仏)での開催が予定されている。