

パワーレーザーが拓く未来社会



研究室紹介

河 仲 準 二*

Power laser makes future brighter

Key Words : Power laser, High field science, High energy density science

はじめに

最近、「レーザーなんてたいそうなものを使ってもコンクリートも満足に切れない。」という話を聞きました。メディアが伝えた、レーザーは何にでも使える万能のツールという認識は一昔前とっていましたが、どうもそうではなさそうです。家に帰ってかみさんに聞いてみると、「え～、切れないの?」と同じ感覚でした。厳格な定義を無視すると、エネルギーの形態は運動や位置などの力学的エネルギーに始まり化学、原子核、熱、光、電気、音などさまざまです。レーザーは光ですが、日常使う蛍光灯などの光と違って決まった波長、揃った位相、制御された偏光を持つ極めて高品質のエネルギーです。これらの性質を存分に使う必要がなければ、いわゆる“ふつうの”光で間に合います。話を元に戻すと、ただ単にコンクリートを切るのであれば今のところレーザー光よりダイヤモンドカッターで切った方が、コンクリートを砕くのであれば破砕機や破砕剤を使った方が簡単です。では、パワーレーザーはどのようなところに使われるのでしょうか?

パワーレーザーが拓く基礎科学と次世代医療・産業基盤

パワーレーザーと言えば、最近では半導体レーザーやファイバーレーザーに代表されるような連続(CW)光もしくはメガヘルツくらいの極めて高い

繰り返し周波数で動作する擬似連続(QCW)光でキロワット級の高い平均出力のレーザーも指すようですが、私が研究開発しているパワーレーザーはナノ秒(1 ns = 10^{-9} s)からフェムト秒(1 fs = 10^{-15} s)の間に大きなパルスエネルギーを持つパルスパワーレーザーです。大阪大学では、1980年代に激光XII号レーザー(図1)と呼ばれる、ナノ秒パルスで10キロジュール級のエネルギーを発生させる大型レーザー装置が開発されました。大きさは体育館サイズです。その後、20年の年月を経てパワーレーザーの技術は進歩し、同程度のパルスエネルギーでパルス時間幅をピコ秒(= 10^{-12} s)にまで短パルス化されたレーザー(LFEXレーザー、図1)が1/3サイズで開発されました。このLFEXレーザーのピークパワーはピコ秒というまさに一瞬ですがペタワット(= 10^{15} W)を超えます。これは2017年の全世界の消費電力の時間平均(2.5×10^{12} W)の一千倍に匹敵します。最近では、パルス時間幅も数十フェムト秒が実現できるようになり数十ジュール程度の少ないエネルギーでペタワット出力を得ることができるようになってきました。

激光XII号のようなナノ秒のレーザー光をそのまま気体や液体、固体などの物質に照射すると、吸収されたレーザー光は多量の熱に変換され物質は一瞬にして高温化します。レーザー光をレンズや凹面ミラーを使って集光してレーザー光の光強度(W/cm^2)を上げて照射すると、複数の光子による非線形な吸収が起こり構成する原子や分子は多光子吸収によりイオン化し、解放された電子はレーザー光によって激しく振動し超高温のプラズマを生成します。同じパルスエネルギーでもピコ秒やフェムト秒のように短パルス化されピークパワーが高くなり集光強度がいっそう大きくなると、物質を構成する原子近傍の電子は原子に属している束縛電子なのか、レーザ



* Junji KAWANAKA

1964年3月生まれ
電気通信大学大学院 電気通信学研究所
電子工学専攻 博士後期課程修了
(1993年)
現在、大阪大学 レーザー科学研究所
教授 博士(理学)
TEL : 06-6879-8728
FAX : 06-6877-4799
E-mail : kawanaka@ile.osaka-u.ac.jp



図1 激光 XII 号と LFEX レーザー

ーが作り出す電場に捕らわれた自由電子なのかの区別がつかなくなり、さらに集光強度を上げると前述の多光子イオン化とは異なるトンネルイオン化と呼ばれる現象によって数多くの電子が剥ぎ取られ超多価イオンが発生するようになります。このように同じパルスエネルギーのレーザーでもパルス時間幅、つまり、ピーク強度によって物質との相互作用は様々な様相を見せ、新たな基礎科学分野を開きつつあります。どのような相互作用であっても高いパルスエネルギーを時間的・空間的に絞り込んで物質に照射しエネルギーを与えるのですから様相は異なるものの従来にない極限の高エネルギー密度状態を生み出すことができます。これらが高エネルギー密度科学です。太陽のような核融合反応や高エネルギー粒子線・ガンマ線発生、新物質創成などを実験室で再現でき、宇宙物理や惑星科学、素粒子、高压物性、材料物性など幅広い基礎科学分野でパワーレーザーは利用されています。

一方、これらの基礎科学分野で得られた知見を利用して次世代の基盤産業として期待されるパワーレーザー応用研究が広まりつつあります。パワーレーザーの直接照射では、従来、切断や穴あけなどの加工を中心とした応用が進められてきましたが、最近では橋梁やトンネル、ビル壁の検査・改修など、危険な場所での困難な作業や熟練の人の感に頼った作業が多かったインフラ再整備、人口衛星の破損を引き起こす宇宙デブリの除去などが研究されトンネル検査や橋梁改修などは実現しつつあります。また、超高ピーク強度レーザーを利用した研究では、レー

ザー加速による重粒子線や中性子補足療法 (BNCT) を利用したガン治療などの医療応用、 γ 線源や中性子源による非破壊検査などの内部診断技術が研究されています。これらの高度な医療・産業利用は高い付加価値を有した日本の次世代医療・産業基盤になることが期待でき利便性の高いパワーレーザーが必要とされています。

パワーレーザーの繰り返し動作化

“どのようなスペックのレーザーがあれば現在の研究を飛躍的に発展させることができるか”という問いをパワーレーザーを利用している研究者に聞いたところ、図2に示すような結果が得られました(レーザー学会「ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学」技術専門委員会による)。また、前述の医療・産業応用にはもっと厳しいレーザー条件(高い繰り返しレーザー動作)が求められています。図中の赤で示したのは、世界においてこれまでに開発された、もしくは、現在開発中の最先端のパワーレーザーシステムのスペックですが、パルスエネルギーと繰り返し動作の両立は難しく研究者や医療・産業界の期待に添えていないことがわかります。これまで高いパルスエネルギーを追求してきた私たちにとって、最も大きな問題は繰り返し動作による熱の問題です。レーザー光のエネルギーを増幅していくには、どんな形であれ一旦エネルギーをレーザー増幅材料の中に取り込まなければなりません。この取り込んだエネルギーをレーザー光として放出させますが、100%の変換効率原理上ほぼありません。ここに損失が生まれレーザー材料内に熱が発生します。繰り返し動作をさせてそのまま放っておくと熱は蓄積されレーザー材料の温度はどんどん上昇します。したがって排熱が不可欠となりますが、排熱をするという行為そのものが、レーザー増幅材料内に温度分布を生じさせます。これは結果として局所的に光学的に異なる厚さをレーザー材料内に発生させることとなり、レーザーがエネルギー増幅のためにレーザー材料を通過する際にレーザーの波面は乱されレーザー光は正常に伝送されなくなります。また、温度差によってレーザー材料内の熱膨張に差が生じ大きさや方向が異なる内部応力が局所的に生まれ複屈折が空間的に複雑に発生します。このため、レーザー光の偏光がレーザービーム断面内で大きく乱れ

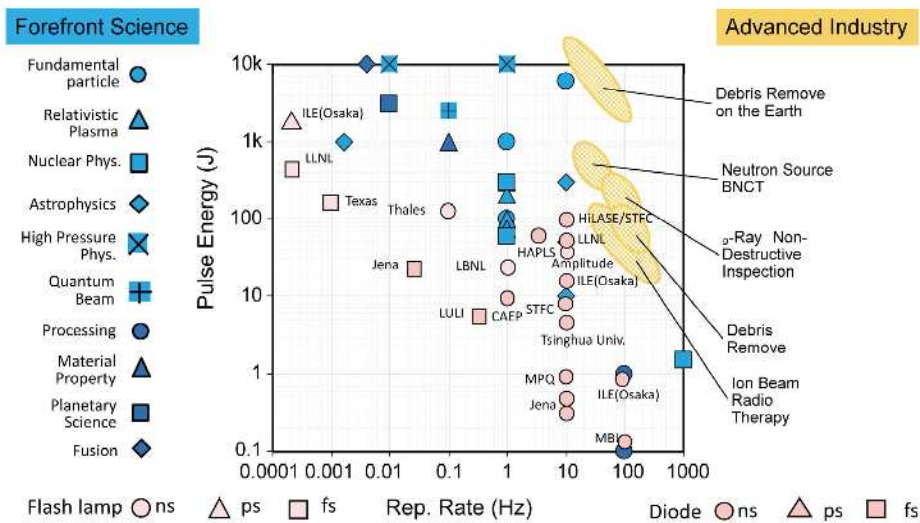


図2 先端基礎科学と次世代産業に必要なレーザースペックと世界における最先端レーザー

ます。さらに急峻な温度分布になると、内部応力が大きくなりレーザー材料が破壊することすら起こります。レーザー材料に限らず、導光に必要なミラーやレンズ、光制御に必要な非線形結晶や回折格子、プリズムなど使用するすべての光学部品はレーザー光を微量ながら吸収するために、高繰り返しのパワーレーザーではこれらの光学部品についても熱問題は大きな課題となります。従って、この熱問題をいかに解決するかが今後のパワーレーザーの社会への浸透を左右すると考えています。

多岐にわたる技術の集結

熱問題を検討する際には、熱発生そのものを低減すること、発生した熱の光に対する影響を低減することの2つの観点から解決を探っています。レーザーは多種多様にわたる技術を総合したシステムですから様々なアプローチが考えられます。熱発生の低減には、蓄積したエネルギーを効率よくレーザー光に変換するレーザー材料1)や、そもそも理論上熱発生が少ないレーザー材料2)などを開発する必要があります。また、熱の光に対する影響を抑制するために、熱伝導率が高いレーザー材料を開発したり1)、レーザー材料の形状とその冷却方法を工夫した増幅器構造3,4)や増幅器間の光学配置を工夫したレーザー伝送光学系を考案することが必要となります。これらの工夫により、今では10J程度のパルスエネルギーで従来一般的であった10Hz動作が100Hz

で動作できるようになりました5)。この成功は多くの研究者の努力によって多方面から改良を進めてきた結果です。ひとつひとつの研究開発は広く深いことから、材料屋さん、光学素子屋さん、光学設計屋さん、システム設計屋さんなど多岐にわたる専門家が最先端のパワーレーザー開発には必要です。逆に言えば、これまでに述べたパワーレーザー応用が現実のものとなれば、自動車産業のように裾野の広い産業基盤が実現できる可能性があると思っています。

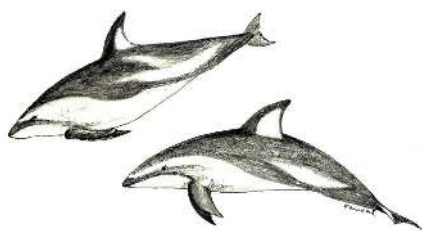
おわりに

今回、皆様には普段馴染みのないパワーレーザーの話をさせていただきました。私どもの研究室ではパワーレーザーの開発を通して科学技術の開拓と新産業基盤および裾野の広い産業基盤の構築を通じた豊かな社会をどのように育んでいくかということを考えながら研究を楽しんでいます。皆様の心の片隅に記憶として残っていたら今回の執筆は成功です。最後までお読みいただきありがとうございました。

参考文献

- 1) J. Kawanaka, K. Yamakawa, H. Nishioka, and K. Ueda, "Improved high-field laser characteristics of a diode-pumped Yb:LiYF₄ crystal at low temperature," Opt. Exp. vol. 10 Issue 10, pp. 455-460 (May 2002).
- 2) T. Shoji, S. Tokita, J. Kawanaka, M. Fujita, and

- Y. Izawa, "Quantum-Defect-Limited Operation of Diode-Pumped Yb:YAG Laser at Low Temperature," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 43 Issue 4A, pp.L496-L498 (Apr 2004).
- 3) S. Tokita, J. Kawanaka, M. Fujita, T. Kawashima, and Y. Izawa, "Sapphireconductive end-cooling of high power cryogenic Yb:YAG lasers," Appl. Phys. B vol. 80 Issue 6, pp. 635-638 (Jan 2005).
- 4) H. Furuse, J. Kawanaka, K. Takeshita, N. Miyanaga, T. Saiki, K. Imasaki, M. Fujita, and S. Ishii, "Total-reflection active-mirror laser with cryogenic Yb:YAG ceramics," Opt. Lett. 34 Issue 21, 3439-3441 (Nov 2009).
- 5) Martin Divoky, Shigeki Tokita, Sungin Hwang, Toshiyuki Kawashima, Hirofumi Kan, Antonio Lucianetti, Tomas Mocek, and Junji Kawanaka, "1-J operation of monolithic composite ceramics with Yb:YAG thin layers: multi-TRAM at 10-Hz repetition rate and prospects for 100-Hz operation," Optics Letters Vol. 40, Issue 6, pp. 855-858 (Mar 2015).



Bottlenose Dolphin