

# パワーレーザーによる超高エネルギー密度の科学とその応用研究

重 森 啓 介\*



研究室紹介

Ultra-high energy density science and its applications with high power lasers

Key Words : High energy density science, Laser Fusion, Laser Processing

## はじめに

レーザーはその発見から50年余り経ち、様々な技術開発により我々の生活に不可欠な存在となっている。レーザー装置も多種多様な展開をみせているが、これを形成する技術はいくつかの方向性で発展しており、その一つが高出力化（ハイパワー化）である。世界各国で巨大レーザー施設が開発・建設され、大阪大学でも世界有数のガラスレーザー装置「激光 XII 号」が1980年代に完成し、装置の改良等を重ねながら現在でも共同利用・共同研究拠点の基幹装置として運用されている（図1）。また、米国ではメガジュール級の大型レーザー装置 National Ignition Facility (NIF) が建設され、レーザー核融合点火や幅広い研究分野に供されている。

このような装置の大型化による高出力化だけでなく、レーザー光のパルス幅（時間幅）を短くすることにより、より高いピークパワーを得るという方向性の開発も行われている。2018年にノーベル物理学賞の受賞対象であるチャープパルス増幅法により、従来よりも3桁以上のピークパワーをもつ超高強度・超短パルスレーザーの構築も可能となった。これによって相対論プラズマをはじめとするさらなる極限的な状態が得られるようになったほか、レーザー核融合の高速点火方式への活用など、より幅広い学際的な研究展開がなされている。



図1 大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号および LFEX レーザー装置

## パワーレーザーによる超高エネルギー密度状態の生成

パワーレーザーを物質に照射すると、その表面に高温・高密度のプラズマが生成する。この高温・高密度、すなわちエネルギー密度の高い状態は、他の手法では得難いユニークなものであり、パワーレーザー技術の発展とともに様々な応用領域が開拓されている。図2にその応用例を示す。高エネルギー密度の定義は、単位体積あたりの内部エネルギーが  $10^{11} \text{J/m}^3$  を超える領域を指し、これは圧力の単位で

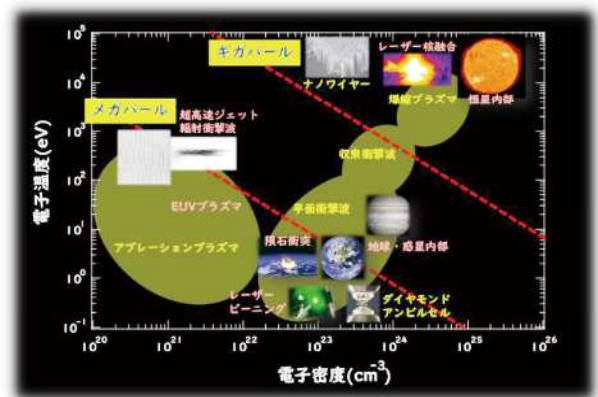


図2 高エネルギー密度状態の様々な形態（黄色が実験室で得る手法、橙が対象となる現象や応用例）



\* Keisuke SHIGEMORI

1971年1月生まれ  
現在、大阪大学 レーザー科学研究所  
教授 博士(工学)  
専門/プラズマ理工学、レーザー核融合  
工学  
TEL : 06-6879-8776  
FAX : 06-6877-4799  
E-mail : shige@ile.osaka-u.ac.jp

は 100 GPa (100 万気圧) 以上に相当する。さらに「超」高エネルギー密度状態は  $10^{14} \text{J/m}^3$  を超える領域とされ、10 億気圧以上という途方もない値である。

レーザー技術の発展と併せて、それをを用いた実験・計測技術も進展し、実験的に得られるパラメータ領域が拡がるとともに、プラズマや核融合といった領域を超えた応用分野にも適用されつつある。この代表的な例がパワーレーザーを用いた実験室宇宙物理である。パワーレーザーで得られる極限状態を宇宙物理で興味のある現象に適用し、これまでも様々な研究がなされてきた。宇宙ジェットや超新星爆発における流体不安定性や、身近なものであれば地球の深部状態（高温・高圧力状態）や隕石衝突の模擬など（図 3）、学際的な領域を開拓している。

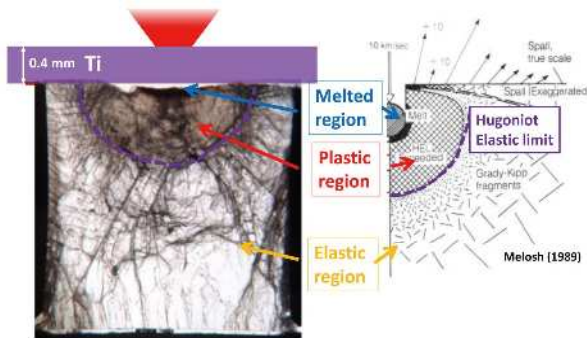


図 3 パワーレーザーによる隕石衝突の模擬実験（回収実験）の結果例

### 超高エネルギー密度状態の極限である核融合への応用

前述の通り、超高エネルギー密度状態の極限状態のひとつが太陽の中心であり、その太陽の中心では核融合反応が起こっている。我々はすでに核融合エネルギーを享受しつつ生きているが、この核融合反応を地上の（電気）エネルギー源として利用するためには、太陽内部に匹敵する高エネルギー密度状態を効率よく生成する必要がある。その一つの方法がパワーレーザーを用いた慣性閉じ込め方式（レーザー核融合）であり、我が国でも新しいエネルギー源の開発研究としてすすめられている。

このレーザー核融合の研究は開始からすでに 50 年以上経過しているが、未だに発電はおろか点火実証にも至っていない。この原因は核融合燃料を圧縮（爆縮）する際に発生する流体不安定性に依る。前述の NIF を用いた実験でも、この流体不安定性の影響により点火まで今一步というところで足踏みして

おり、その解決に向けた研究が精力的にすすめられている。大阪大学ではこの流体不安定性の影響を軽減した高速点火法による核融合点火の研究をすすめ、よりコンパクトなレーザー核融合炉実現に向けた開発を行っている。



図 4 レーザー核融合燃料保持のためのダイヤモンドカプセル

### 超高エネルギー密度状態を用いたレーザー加工技術の開発

超高エネルギー密度状態がより簡便に得ることができるようになったことから、基礎科学分野だけでなく産業・工業への展開も模索されつつある。例えばパワーレーザーを用いた加工技術に関しては、これまでレーザーのパワー密度で決定される制限要因があった。そのプロセスとしては、融解現象を軸とした表面加工がその主たる対象であったが、パワーレーザーを物質に照射したときに発生する衝撃波を活用することにより、その奥深くまで残留応力の付加（ピーニング）等の加工を施すことが可能である。さらに圧力を上げると構造相転移や化学反応を誘起することも可能であり、材料そのものを加工するという新たな展開も期待できる。このようなパワーレーザーを用いた新しい加工技術の開発を行うべく、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」プロジェクトの下で、レーザー加工ユーザー企業等と連携した研究を実施している。

### 高繰り返しパワーレーザーが拓く新しい世界

パワーレーザーの応用は様々な領域に拡がり、その深化をみせつつあるが、パワーレーザーの一つの難点が繰り返し運転に不向きというものがある。熱

伝導率の低いガラスを母材としたレーザー媒質を白色光であるフラッシュランプで励起する、という手法は熱的な条件が厳しいため、前述のような巨大レーザーでは1時間～数時間に1ショットという効率の悪い運用に縛られている。一方で、熱伝導率のよいセラミック母材のアクティブミラー方式の増幅器をLD（レーザーダイオード）で励起するという次世代の高繰り返し固体レーザー装置の開発が急速に進んでいる。この方式では大口径のレーザー光源を単体で得ることは難しいが、小型のビームをクラスター化させることにより、疑似的に単一の大型ビームを構築することが可能である。

この高繰り返しパワーレーザーを用いることにより、そのショット数を飛躍的に増大させることができることから、単に沢山のデータを実験で収集することに留まらず、機械学習等の近年の知見を組み合わせることにより、新たなサイエンスの境地を切り拓くことが期待されている。その研究分野も高エネルギー密度科学や核融合の開発研究に限らず、レーザー加工や粒子加速、核科学や医療応用など、幅広い応用分野も視野に入る。以上の要素を取り入れた次世代レーザー装置が、第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2020）に「パワーレーザーインテグレーションによる新共創システム：J-EPoCH計画」として提案されており、その実現に向けた取り組みが進められている。



図5 パワーレーザーインテグレーションによる新共創システム：J-EPoCH計画の装置概念図

## おわりに

パワーレーザーを用いた超高エネルギー密度科学の研究は、新エネルギー源である核融合の研究とともに開始・発展し、超高強度レーザーの登場を経て学際的な研究領域を開発してきた。これに高繰り返しという新たな価値観（付加価値）を組み合わせることにより、質的・量的に劇的な変化を起こしつつある。このような状況を反映し、さる6月16日に日本学術会議より「パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子的飛躍と産業創成」という提言が出された。今後の高エネルギー密度科学研究のさらなる展開を期待いただきたい。

## 参考文献

- 1) Kodama, R., Norreys, P. A., Mima, K., Dangor, A. E., Evans, R. G., Fujita, H., Kitagawa, Y., Krushelnick, K., Miyakoshi, T., Miyanaga, N., Norimatsu, T., Rose, S. J., Shozaki, T., Shigemori, K., Sunahara, A., Tampo, M., Tanaka, K. A., Toyama, Y., Yamanaka, T., & Zepf, M. (2001). Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition. *Nature*, 412(6849), 798–802.
- 2) Nagaki, K., Kadono, T., Sakaiya, T., Kondo, T., Kurosawa, K., Hironaka, Y., Shigemori, K., & Arakawa, M. (2016). Recovery of entire shocked samples in a range of pressure from ~100 GPa to Hugoniot elastic limit. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(6), 1153–1162.
- 3) Kato, H., Yamada, H., Ohmagari, S., Chayahara, A., Mokuno, Y., Fukuyama, Y., Fujiwara, N., Miyanishi, K., Hironaka, Y., & Shigemori, K. (2018). Synthesis and characterization of diamond capsules for direct-drive inertial confinement fusion. *Diamond and Related Materials*, 86.
- 4) <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t291-2.pdf> (日本学術会議のホームページより)