

チャープパルス増幅と位相制御による 超高速・高強度光科学



加藤 義章

光産業創成大学院大学
y.kato@gpi.ac.jp



森 芳孝

光産業創成大学院大学
y.mori@gpi.ac.jp

光のパルス幅を極限まで短くしたら、どのような現象が見えるだろう？ 光の強度を極限まで強くしたら、どのような新しい現象が起こるだろう？

超高速・超高強度のフロンティア開拓に決定的な役割を果たしたチャープパルス増幅 (Chirped Pulse Amplification, CPA) を発明した Gérard Mourou と Donna Strickland に、光ピンセットを発明した Arthur Ashkin と共に、2018年ノーベル物理学賞が授与された。

チャープパルス増幅は、超短パルス・高強度レーザー光を生成する方法である。CPAにより小型で高出力の Table-Top Tera (10^{12}) watt レーザーが約30年前に誕生した。その後レーザーの高出力化が急速に進められ、10ペタ (10×10^{15}) ワットレーザーが2019年に稼働を開始した。

超高速の現在の到達点として、光振動電場で僅か1.6サイクルの3.8フェムト (10^{-15}) 秒パルスが可視域で、170アト (10^{-18}) 秒パルスが極端紫外域 (100 eV) で実現され、光電場の直接測定、電子運動の制御、電子間相互作用の解明などが可能になった。

光強度に関しては、光による電子振動速度がほぼ光速になるのに必要な強度 (1.4×10^{18} W/cm²) を超え、陽子振動の相対論域速度に必要な強度 (4.7×10^{24} W/cm²) に近づきつつある。欧州プロジェクトとして2011年から建設が進められてきた先端高強度レーザー施設 ELI (Extreme Light Infrastructure) が2018年に完成し、真空構造解明などへの取り組みも本格化している。

1979年に田島-ドーソンが提案したレー

ザー航跡波電子加速がCPAレーザーにより1994年に実証され、近年はレーザー駆動電子加速器やレーザー駆動自由電子レーザー実現に向けて、加速電子のエネルギー、単色性、電荷量向上に向けた研究が進められている。レーザーによる高エネルギーイオンの生成と利用に関する研究も展開され、更に高エネルギー密度状態に関する研究も大きく進展している。

J. L. Hall と T. W. Hänsch により発明された光周波数コム位相制御法 (2005年ノーベル物理学賞受賞) により、超短パルスレーザー光の光電場の位相をその包絡線に対し安定に保つことが可能になった。これにより、軟X線域での単一アト秒パルス生成などが可能になり、周波数と位相が完全に制御された超高強度光場による新領域がこれから拓かれようとしている。一方、CPAレーザー生成テラヘルツ域高強度短パルス光により、破壊を伴わない固体の非線形光学現象の観測が可能になり、物質科学にも新たな展開が生まれている。

超短パルスレーザーは、屈折矯正手術といった身近な応用に用いられると共に、固体の微細加工など産業分野でも利用が広がっている。また、レーザー生成電子線によるフェムト秒分解電子線回折が実現され、新しい分析装置の開発も期待される。

超高速・高強度光科学の今後の展開には、レーザーの高度化が不可欠である。高出力半導体レーザー励起に適した新レーザー材料の探索、多ビームコヒーレント結合、1サイクル超高強度レーザー生成など多様な可能性が追求されている。

—Keywords—

チャープパルス増幅：

光学素子の破壊を回避し、高強度レーザー光を生成する手法。超短パルスレーザー光を、分散素子を用いて周波数が時間的に変化するチャープパルスとし、パルス幅が長く低強度のチャープ光を増幅後に、分散を元に戻して超短パルス・高強度のレーザーパルスとする。

強い光場における荷電粒子の運動：

光電場中の荷電粒子速度の最大値 v_0 は、規格化した電場振幅 $a_0 = qE_0 / (mc)$ を用いて近似的に $v_0 = a_0 c$ (c は光速) と表される。 a_0 が大きくなると v_0 が c に近づくので、 $a_0 = 1$ は粒子運動が相対論的になる目安を与える。この条件に相当する光強度は、電子では $I = 1.4 \times 10^{18}$ W/cm²、陽子では $I = 4.6 \times 10^{24}$ W/cm² となる (波長 $1 \mu\text{m}$ の場合)。

光周波数コム位相制御：

高線り返し超短パルスレーザー光は、等間隔周波数の多数の光 (光周波数コム) のコヒーレントな重ね合わせとして生成される。光コムを最小周波数がゼロと一致するように位相を制御すると、光コム全ての周波数が確定すると共に、超短パルス光の包絡線と光振動のピークを一致させることができる。