

## もっと光を！ レーザー科学が拓く科学と技術

阪部周二\*

### 1. はじめに

近年、「光」の重要性がよく謳われ、「国際光年」や「光の日」も設けられた。しかし、宇宙を含む自然界の物理では光の重要性は至極当然なものである。筆者は大学院理学研究科での講義「高強度レーザー科学」の初回に、標準模型と力の話によりこの講義を切り出す。自然界には4つの力がある。強い力や弱い力はfm~amの極近距離にしか作用しない。他方、重力と電磁力はその力は無限遠に及ぶ。しかし、電磁力は重力の38桁も大きい。よって、電磁力は我々にとって最も重要な力である。この電磁力が作用する荷量は「電荷」である。そして、電荷をもつ最も軽い素粒子がレプトンの「電子」である。化学も生物もこの電子の動きでまわる現象を論じている。総ての現象で「電子」が主役を張っている。他方、素粒子間に働く力はゲージ粒子の交換により生じる。そして、電磁力のゲージ粒子は「光子」である。よって、電磁力が重要ということは、「光子」が「電子」と同様に重要であることになる。決して「電子」だけが主役で「光子」が脇役でなく、両方とも主役である。それにも関わらず、大学には「電子工学科」はあっても「光子工学科」はない。それは、電子を能動的に制御することはできても、光子にはその術が無かったからである。そこに、20世紀最大の発明があった、「レーザー」である。レーザーを手にした人類は、これから光を自由に操り総ての現象を能動的に制御することに挑戦できるようになった。少なくとも、今まで「電子」が関わったことは総て「光子」でも可能であろう。以上が上述の講義の「はじめに」である。100年前にアルバート・アインシュタインが理論的に発見

した光の誘導放出が、「レーザー装置」となったことまでは、博士も予想できたかもしれないが、博士が予見した重力波をこのレーザー装置により捉えることができる事までは予想できなかったであろう。「レーザー技術」の発展が成し得た世紀の成果である。

現在では、様々な分野にレーザーが利用されており、利用されていない分野はないとも言える。このように光子利用が進むなか、まだ主役になっていない分野が、素粒子・核物理、中性子科学、放射線科学、加速器科学、宇宙物理学といったいわゆるビッグサイエンスの分野である。これらの分野で求められるレーザーは一般に大きな出力を必要とし、大出力レーザーの技術開発が必要であるが、極限探求科学からのレーザーへの厳しいニーズがあればこそ、困難な技術開発も進む。今日まで、大出力レーザー技術開発を牽引してきたのが「レーザー核融合研究」である。

### 2. レーザー核融合用大出力レーザー

レーザーの発明後、間もなく、米国よりレーザーを用いた爆縮核融合の概念が提案され、1970年代後半から、米国、日本、欧州において、大型レーザーが建設された。特に、日米がレーザー核融合研究においてしのぎを削った。オイルショックという社会現象が核融合研究の追い風になったのは事実であるが、このような研究がなければ、大出力レーザー技術開発への扉は開かなかったであろう。

我が国では大阪大学レーザー核融合研究センター（当時）において、核融合研究が進められてきた。大きな光のエネルギーを取り出すには、当

\*京都大学化学研究所附属先端ビームナノ科学センターレーザー物質科学研究領域

然大きな媒質が必要であるが、固体では非結晶のガラスしかなく（現在ではセラミック結晶の開発が進んでいる）、初期にはシリケートガラスにNd<sup>3+</sup>をドープしたものが用いられた（激光II号レーザー）、その後、非線形屈折率を抑える為に母材を鉛ガラスにしたものが用いられている（激光IV号レーザー）。1983年に、当時世界最大出力のガラスレーザー装置「激光XII号」装置が完成した（現在も現役で稼働しているが、当時グループリーダーとして建設に携わった者としては、複雑な心境である。35年も経ち、レーザー技術も進化しているはずなのに、この科学技術立国の我が国で、最先端のものに入れ替わっていない）。日米でしのぎを削った大出力レーザー開発建設競争も、磁場閉じ込め核融合装置ITERの建設が始まる頃に、我が国は米国の後塵を拝するようにならざるを得なくなった。米国では、国立点火施設が建設され、人類史上最大出力のMJレーザーが実現された。今後、大出力レーザー技術開発には、核融合科学分野だけではなく、他の分野からも強いニーズとそれを財政的に支援しようと思わせる魅力的な目的が求められる。

### 3. 短パルス高強度レーザー

1990年頃から、カーレンズモード同期や広帯域レーザー結晶の開発により短パルスレーザーの開発が飛躍的に進んだ。それと相まってCPA（チャープパルス増幅）の発明により、テーブルトップサイズのレーザーからTW級の高い尖塔パワーが実現された。これらを物質に集光すると電子が相対論的運動をするような強度に達するので「(超)高強度レーザー」と呼ばれている。今まで、大出力レーザーでも実現できなかった強度が、テーブルトップサイズレーザーでも実現でき、大出力大型レーザーでの専売特許だった高強度科学研究が小型レーザーでも可能となり、ビッグサイエンスのスマールサイエンス化が期待された。たしかに、テーブルトップ高強度レーザーの出現により、レーザー化学、アト秒科学、高強光場科

学など新しい学術分野が拓かれたが、冒頭のビッグサイエンスの分野ではさらなる高強度が必要で、結局まだ大型（且つ高繰返しの）装置が求められる。

このような中、欧州を中心にELI (Extreme Light Infrastructure) などの大型高強度レーザー施設の建設が進んでいる。我が国では大阪大学のLFEXレーザー、量子科学研究機構のJ-KAREN-Pが稼働を始めている。しかし、今後は上述の分野の研究者が自身の研究に対して真に強いレーザー必要性を主張して、レーザー開発にも携わっていかなければ、レーザー技術の進歩はないであろう。さらに、このような大型施設を用いた研究のためにも、その要素基盤研究や準備研究を行える、TW級レーザーを整備した研究室が多く必要である。いわゆるこの分野を支える裾野の拡大である。残念ながら、現状ではそのようなコミュニティに共同利用提供できる施設を有する研究室は大型施設研究所以外では筆者のところのみである。

### 4. 高強度レーザーによる量子線発生とその応用

高強度短パルスレーザーはレーザーナノプロセスから量子ビーム科学まで、様々な応用分野を拓いた。筆者の研究室でも幅広い研究に取り組んでいるが、ここではレーザー加速電子の応用について紹介する。高強度短パルスレーザーを固体標的に照射すると、レーザー光の電場により電子が加速される。原理的に電子パルス幅はレーザーのパルス幅に等しく、加速器を不要とする短パルス電子源となる(注：一般に「電子のレーザー加速」と呼ばれているのは、「レーザー航跡場加速」であり、それは厳密に言えば、レーザー生成プラズマ加速である。このレーザー光場直接加速とは異なる)。筆者らは、高強度フェムト秒レーザーと薄膜との相互作用により加速される短パルス電子を用いた超高速電子線回折装置(UED)を開発している。加速電子のもつエネルギー広が

りによるパルス幅広がり、位相回転によるパルス自己圧縮により補償し、単一パルスでの回折パターンの撮像に成功した。また、その電子パルスの測定を高強度レーザーによるポンデロモータイブ散乱により行った。これは、レーザーとレーザー加速電子により散乱実験を行える事の実証にもなる。筆者の研究室では、高輝度のレーザー生成電子線源の開発に取り組んでいるが、その過程で、レーザーと金属ワイヤーとの相互作用により加速放射される電子が金属ワイヤー方向に誘導されることを発見した。この現象の物理を調べるために、UED のパルス電子を用いて電子偏向法によりワイヤー近傍の電磁場のダイナミクスを調べた結果、ワイヤーに強力な表面波が伝搬していることを見いだした。このモノサイクルのサブテラヘルツ表面電磁波は、テラヘルツ波を物性診断の道具から加工への道具へと発展させる可能性がある。また、この強力なモノサイクル表面波は高速ストリークカメラへの応用も考えられる。

## 5. まとめ

光（光子）が重要なのは物理では当然だが、人類はレーザーを手にすることにより初めてその光を能動的に制御して利用できるようになった。レーザーの利用・応用はほとんど総ての分野に渡ってきているが、ビッグサイエンスの分野で求められるレーザーは一般に大出力大型となり、さらなる技術開発が必要である。レーザー核融合研究はこれを牽引してきたが、今後、核融合だけではなく他の分野（加速器や宇宙科学など）からの強いニーズもレーザー技術開発を加速させることが期待される。同時に、ビッグサイエンスの基盤となる要素研究が広く行なわれなければ、その分野は発展しない。そのためにも小型高強度レーザーの開発が重要となる。大型施設でも小型装置でもレーザー要素技術は共通である。いずれにしても光の重要性が非常に高まっている中、我が国のレーザー技術力を高めなければならないが、産業界に目を向けてもレーザー開発に関しては欧米

から遅れをとっている現状は否めない。学界では基礎研究に対する財政基盤が脆弱であり、レーザー光源開発を行っている大学は殆どない。光の時代と言われる今世紀において科学技術立国として世界をリードするには、国のしっかりとした基礎研究財政支援と、レーザー技術者・開発者の人材育成が喫緊の課題である。

高強度レーザーの応用を本誌上で総てを紹介することはできないので、一般社団法人レーザー学会が刊行する会誌「レーザー研究」の解説論文を参考論文として下記に掲げる。また、本誌で紹介した筆者らの最近の研究の論文のリストも紹介する。

## 謝 辞

この度、講演の機会を与えていただきました京都大学化学研究所教授宗林由樹先生はじめ（財）海洋化学研究所、講演を聴講頂いた方々に感謝申し上げます。

## 参考文献

### 大型、大出力レーザーとその応用例

- レーザー研究 44 巻 9 号 (2016)「パワーレーザーで探る宇宙物理」
- レーザー研究 43 巻 9 号 (2015)「パワーレーザーの宇宙航空応用」
- レーザー研究 43 巻 2 号 (2015)「レーザー駆動中性子源の開発と応用」
- レーザー研究 42 巻 2 号 (2014)「欧州における超高出力レーザー開発の最前線」
- レーザー研究 41 巻 1 号 (2013)「高エネルギー密度科学への誘い」
- レーザー研究 39 巻 1 号 (2011)「レーザーの宇宙科学技術への応用」
- レーザー研究 37 巻 2 号 (2009)「重力波検出技術とレーザー開発」
- レーザー研究 34 巻 6 号 (2006)「レーザー推進」
- レーザー研究 34 巻 2 号 (2006)「レーザー加速の最前線」

レーザー研究 32 巻 5 号 (2004) 「レーザー核融合の新展開」

レーザー研究 31 巻 11 号 (2003) 「超短パルス高強度レーザーが拓く科学と技術」

本文で紹介した筆者らの最近の研究

レーザー研究 43 (3), 138 (2015).

顕微鏡 50 (3), 164 (2015).

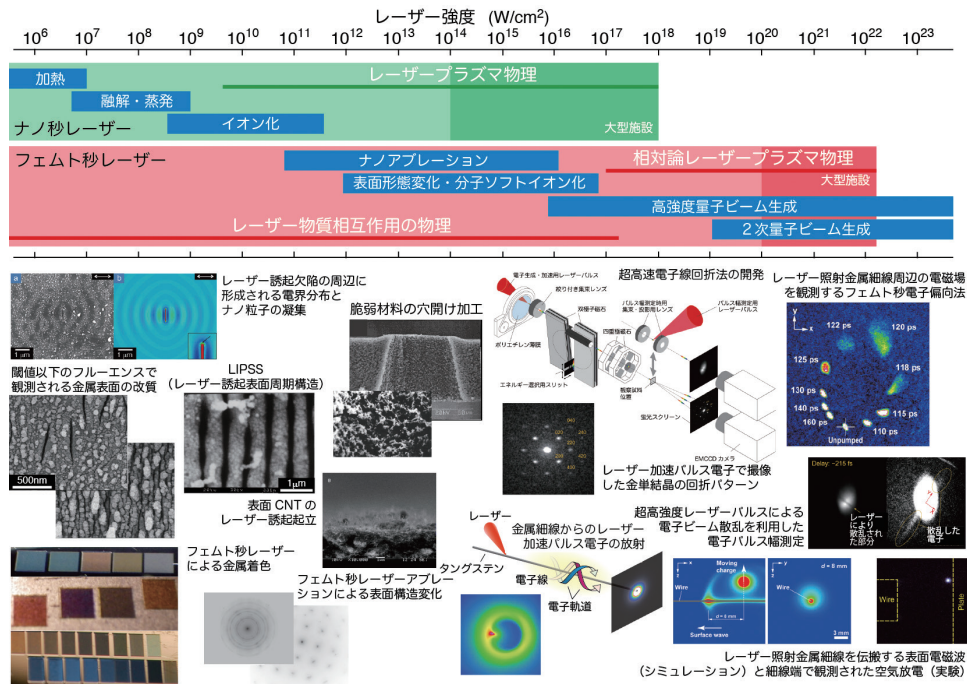
Scientific Reports 5, 8268 (2015).

Physical Review Letters 110, 155001 (2013).

Physical Review Letters 109, 185001 (2012).

Physical Review Letters 106, 255001 (2011).

Physical Review Letters 105, 215004 (2010).



筆者らの研究室で行っている「高強度レーザーと物質との相互作用の物理と応用」に関する研究