

高強度レーザー科学

阪部周二*

1. はじめに

科学が研究の対象としている自然は極小の素粒子・原子核から生命や地球を含むマクロ物質、そして極大の宇宙など多様な階層から成り立っている。このどの階層の物理を論じる際にも重要な要素、それは「光」である。光を自由に操ることができるようになったのは、20世紀最大の発明の一つと言われる「レーザー」が出現した時からである。それまで、光は観測という比較的受身の対象でしかなかったのであるが、レーザーにより光を能動的に制御・利用ができるようになった。レーザーが光科学を开花させたと言える。レーザー誕生50年を経た現在、レーザーは科学のみならず産業界、医用など日常生活に密着した応用にまで広く普及しており、レーザー技術、レーザー応用は未だにさらなる進化の途にある。21世紀は光の時代と言われている。

科学分野においても様々な物理探究や応用を念頭に究極の光を求めたレーザー開発はすすんでいる。極短波長を目指したX線レーザー（X線自由電子レーザー）、極短パルスを目指したアト秒レーザー、超高尖塔パワーを目指したEWレーザーなど。

大出力レーザー技術はレーザー核融合研究の進歩とともに発展して来た。しかし、ナノ秒レーザーでは大型装置をもってしても強度は 10^{16} W/cm²に留まっていた。また、ナノ秒レーザーを物質に照射しても、パルス幅の時間に物質が

プラズマになるために相互作用の主対象はプラズマであり、大出力レーザー物質相互作用はレーザープラズマ物理学者だけの関心であった。しかし、近年の短パルスレーザー技術の飛躍的な発展により、超高強度極短パルスレーザーはいま新しい科学と応用を展開しようとしている。つまり、チタンサファイアを代表とする広帯域遷移金属ドープ結晶の開発とカーレンズモード同期などの短パルスレーザー技術の発展、そして、チャープパルス増幅の発明などが相まって、高強度レーザーは目覚ましい発展をとげ、テーブルサイズのレーザーからでも大型施設に匹敵する尖塔パワーが得られるようになった。集光強度も、僅か $100\mu\text{J}$ のエネルギーでも 10^{16} W/cm²の強度になり、テーブルトップ級でも 10^{19} W/cm²に達し、大型施設では 10^{22} W/cm²に至る強度が実現できている。これにより「高強度光場科学」といった新しい学問分野が拓かれつつある。このような高強度の光場の中、例えば、 $>10^{16}$ W/cm²では多光子電離、光場電離、自己位相変調といった非線形現象や、電子の運動が相対論的になる $>10^{18}$ W/cm²では電子の八の字振動、Ponderomotive力、光の自己収束といった様々な現象が生じる。これらの物理及び、高次高調波発生（アト秒パルス発生）、高エネルギー放射線発生、レーザー加速などへの応用などが研究課題になっている。超高強度光場科学の分野では、EW（ 10^{18} Wエクサワット）レーザー開発、それによる陽子相対論、そして

*京都大学化学研究所附属先端ビームナノ科学センター教授

第254回京都化学者クラブ例会（平成23年8月6日）講演

真空崩壊へと関心が広がっており、近い将来に素粒子・原子核物理の分野においてもレーザーは重要なツールになるかもしれない。さらに、単に高強度というだけでなく短パルスという特徴が物質相互作用の現象を一層豊かにしている。つまり、様々な緩和過程よりも速く高強光場に物質をおくことができる。大型分子に照射しても解離させることなく分子ごとイオン化でき、固体表面に照射しても表面をプラズマ化膨張させることなく固体密度領域との相互作用を実現できる。これらは、あたらしいレーザープロセッシングや物質創成を拓く可能性がある。

我々は超高強度極短パルスレーザーを用いて、高強光場中での物質との相互作用の物理を明らかにするとともに、放射線発生の機構解明とその応用、物質表面との相互作用とそのプロセッシングへの応用の研究を行っている。

2. 超高強度短パルスレーザーによる高エネルギー放射線発生

レーザーの強度が $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ を越えると、電子の運動は相対論的になり、光場による電子の直接加速が生じる。P偏向の極短パルスレーザーを、例えば、数 μm 厚さの薄膜に照射すると反射位置では光は物質内部には入らず、真空側だけに存するので、表面の電子は実効的に表面垂直方向に加速される（真空加熱）。あるいは、さらに高い強度ではローレンツ力 $J \times B$ が大きくなり、光の進行方向に加速される（ $J \times B$ 加速）。実際には、これらの現象を含め複合的に複雑な加速物理があると考えられ、それを実験的に明らかにすることは我々の研究課題の一つである。さらに、このような電子加速が駆動源となり様々な放射線発生が起こりうる。例えば、上述の薄膜上のレーザー集光点の電子が瞬時に加速されると、加速された電子群と薄膜との間

に大きい電場が形成され（シース電場）これにより薄膜上のイオンが加速される。当然、レーザー強度が高いとイオンは高エネルギーに加速されるが、より効率的に加速するためのターゲット構造などを探求している。

また、短パルス高強度レーザーをレーザー波長よりも十分に小さい孤立固体（クラスターやナノ粒子）に照射すると、瞬時に標的より電子を剥離イオン化し、イオン群となった標的はそのクーロン反発力により爆発し、高エネルギーイオンを四方に発する（クーロン爆発）。例えば、重水素クラスターに高強度レーザーを照射すると、クーロン爆発により発した重水素イオン同士が衝突し、核融合反応により中性子を発生する。次世代の小型中性子源の可能性を探るべく、高強度レーザーとナノ粒子の相互作用の研究にも取り組んでいる。

高強度レーザーと物質との相互作用では Ponderomotive 力などにより電子が加速され、それは X 線、THz などの源になりうる。レーザーと大気やクラスターガスなどとの相互作用による THz 発生機構を明らかにしている。

3. 超高強度短パルスレーザー加速電子を用いた単一ショット超高速電子線回折

近年、物質の極微細状態変化のような構造的動力学を単一原子の振動時間尺度で直接観察する技術としてパルス X 線や電子による時間分解回折が研究されている。電子の利点は原子弾性散乱断面積が X 線のそれに比べ約 5 桁大きいことであり、時間分解電子線回折（TRED）は低強度条件下でも原子レベルの分解能で過渡的構造変化を決定することができると考えられる。しかし、今日までの TRED 実験は数 ps の時間分解能に留まっている。フェムト秒の時間分解で物質過渡構造変化を直接測定できる単一パル

ス超高速電子線回折 (UED) を実現するためには十分な強度のフェムト秒電子パルスの発生が不可欠である。最近までの UED 研究は短パルス電子を低強度フェムト秒レーザーとフォトカソードを用いて発生するものである。この方式では電子線を回折に利用できる数100keV のエネルギーにまで加速しなければならない。この間に空間電荷効果によりパルス幅は大きく広がる。この問題を解決するためにパルス内の電子密度を下げる方法が報告されているが、撮像には多数の電子パルスを必要とし、可逆的過程の観察に限定される。諸現象に見られる構造的動力学の殆どが不可逆的であるので、単一パルスにより回折像を捉えなければならない。そのため回折に適したエネルギーでかつ十分な電子量の極短パルスが不可欠である。

我々は上述の高強度短パルスレーザー加速電子による UED の実証研究を進めている。レーザーは高密度プラズマ中で相互作用し、光場により微小空間内で瞬時に電子を数100keV に加速することができ、そのパルス幅はレーザーのパルス幅と同程度になる。さらに、その加速過程により生じる電子の運動量広がりを利用し、位相反転を用いれば、電子パルスを元の幅にまで自己圧縮することができる。これらの高密度、短パルス、位相反転自己圧縮などの特徴を活か

せば、UED に求められるパルス電子線源を実現でき、時間分解回折像を取得できる可能性がある。

4. フェムト秒レーザーアブレーションの物理

ナノ秒パルスレーザーを固体に照射するとこのような過程によりアブレーションが起こる。レーザーパルスの前半部分により固体表面が加熱 ($<10^7 \text{ W/cm}^2$) され、液化 ($10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$) ・気化 ($\sim 10^9 \text{ W/cm}^2$) ・プラズマ化 ($>10^9 \text{ W/cm}^2$) とすすみ、生成されたプラズマ中をレーザー光が共鳴密度まで進みながら吸収されていく。吸収されたエネルギーは熱伝導や輻射により深部に (アブレーション面まで) 伝わり加熱される。加熱されたプラズマは膨張により冷めていく。レーザーが照射されている間は等温膨張し、パルスが終わると断熱膨張する。結果として、吸収されたエネルギーが熱伝導等により深部に伝わり、液化蒸発に足る温度まで達した領域が剥離される。

しかし、フェムト秒パルスレーザーを用いたアブレーションでは現象は異なる。上述の過程では、蒸発に足るエネルギーが与えられてはじめてアブレーションが起こり、この時のレーザーエネルギー面密度 (フルエンス) がアブレーション閾値を与える。ところが、フェムト秒レ

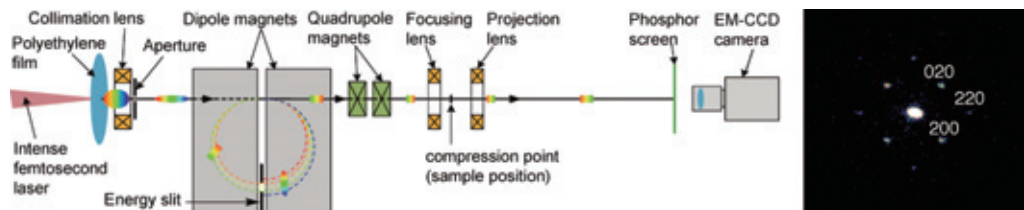


図1 高強度フェムト秒レーザー加速電子のパルス圧縮とそれを用いた超高速電子線回折実験
超高強度極短パルスレーザーにより加速された電子パルスの位相を反転させ、試料位置でパルスを圧縮することにより短パルス電子線を実現。金の単結晶の電子線回折像を単一ショットで撮像。

ザーではこの閾値よりも小さいフルーエンスでもアブレーションが起こる。しかも観測されるアブレーション率（レーザー1パルス当たりのアブレーション深さ）は0.01nmと原子サイズ以下にもなる（実際はこのようなことはあり得ないが、アブレーションしている部分としていない部分が混在して、平均値としてこのようなアブレーション深さになっている）。このような低いアブレーション率は橋田昌樹らにより初めて見いだされた。これらの現象の物理の解明が我々の研究課題である。フェムト秒の場合はフルーエンスが小さくとも強度が極めて高いので、多光子過程や光場電離、局所的なクーロン爆発といった現象により、原子サイズレベルでの固体表面からの脱離が生じているかもしれない。ナノ秒レーザーの場合の熱的な過程とは異なり、フェムト秒レーザーでは動力的現象が起こっているようである。加えて、最近特に注目を集めているのは、照射後の表面にサブナノスケールの構造が自己形成されていることである。フェムト秒レーザーによるレーザー波長より短い周期ナノ構造形成は日本とドイツの研究者がほぼ同時期に発見し報告している。金属については橋田昌樹らが発見した。ナノ秒レーザーの場合、入射光と反射光で形成される定在波により周期的強度分布ができ、アブレーションの結果として周期的構造が形成されることは良く

知られているが、その周期はレーザー波長よりは決して小さくならない。ところがフェムト秒レーザーの場合、波長よりも小さい構造が形成される。我々はこの周期構造格子間隔を解釈できる機構として、レーザー光の表面プラズマ波へのパラメトリック崩壊を提案しており、この機構による周期構造格子間隔のレーザーフルーエンス依存性が様々な金属や異なる波長に対しても普遍的に適応されることを示した。さらに、飛散イオンのエネルギー分析や表面の結晶相転移などを調べ、アブレーション機構の解明に取り組んでいる。

5. 高い安定性と稼働率を誇る高強度短パルスレーザー装置 (T⁶-laser)

我々はTW級のチャープパルス増幅レーザー装置が出現した頃より独自にレーザー装置の構築に取り組み、レーザー物質相互作用研究を行ってきた。現在では市販品もあり、世界の多くの研究機関にTW-PW級フェムト秒レーザーが設置されている。そのような中、我々のレーザー装置はその高い安定性、信頼性と稼働率を誇っている。その理由は、自作であるが故に装置の細部に渡るまで熟知しており、いかなる故障にも迅速に対応でき、恒常的に高品位化に務めているためである。そして、京都大学化学研究所レーザー科学棟の温度湿度制御されたクリー

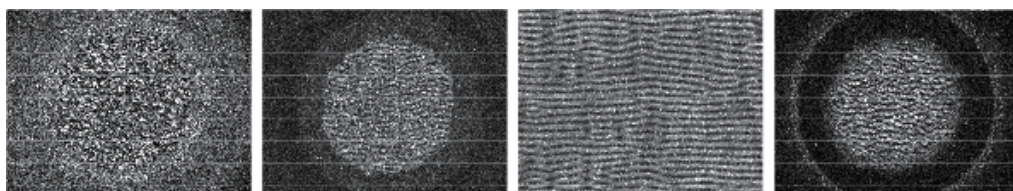


図2 フェムト秒レーザー照射金属表面に自己形成されたナノ周期構造（左から チタン，白金，モリブデン（拡大），タングステン）レーザーの空間強度分布の影響を減じる為に、スーパーガウス型の強度分布に成形して、金属に照射。中央部の広い領域に一樣な周期構造が自己形成された。



図3 京都大学化学研究所の高強度短パルスレーザー装置 (T⁶レーザー)
(奥の窓の向こう側がレーザー照射室)

ン室に設置していることがさらなる高い安定性を実現している。また、教育的配慮から、システム全体を細部にまで見渡せる配置にしており、学生の装置理解を容易にしている。さらに、運転方法、維持方法、故障対応法などが整然と我々の研究室ホームページに管理されており、新入生や学外からの共同研究者にも自身で運転できる環境が整備されている。これらは大学に設置している装置としては極めて重要なことであり、大学院生は自学により触れながらレーザー装置の原理や構成を学ぶ事ができる。先端装置であればあるほど大学院生の学べる環境は重要と我々の研究室では考えている。

6. 結 言

以上、筆者の現在取り組んでいる研究を中心に述べましたが、あらゆる分野において光はその応用の潜在能力をもっており、今後レーザー

技術と応用のさらなる発展が期待されます。

本誌の読者はそのほとんどが筆者と専門を異にする方々と思いますが、「何が起こるか分からないがまずは光を照射してみる」ことが新たな研究の第一歩となることが多くあります。化学研究所では共同利用・共同研究拠点として、積極的に異分野との連携をすすめており、同研究所のレーザー装置を活用した共同研究を歓迎いたします。また、「このような光源がほしい、あるいは可能か」、「試しに照射してほしい」などの相談にも対応させていただきます。厳しいニーズがあることによりレーザー技術も発展していきます。多くの方々に光・レーザーに関心を持っていただければ幸いです。

文末ではございますが、この度、講演の機会を与えていただきました宗林由樹先生はじめ財団の関係者の皆様に感謝申し上げます。