



## 小特集 ターゲット表面プラズマ密度制御による電子・イオン加速の物理と レーザーパルスコントラスト制御技術

### 7. レーザーと微細構造をもった媒質との相互作用と密度制御

#### 7. Interaction and Density Control between Laser and Medium with Fine Structure

岸本 泰明, 松井 隆太郎

KISHIMOTO Yasuaki and MATSUI Ryutaro

京都大学大学院エネルギー科学研究科

京都大学学際融合教育研究推進センター 非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット

(原稿受付: 2020年11月24日)

フェムト秒オーダーの高強度レーザーと物質との相互作用を利用した応用研究の進展を背景に, そのようなレーザーとサブ  $\mu\text{m}$  オーダーの微細構造に特徴付けられる大きな比表面積を有するターゲット (“**構造的ターゲット**”として参照)との相互作用を通して生成されるプラズマの構造とダイナミクスについて考察する. 大きな比表面積は, レーザーの吸収率を増加させるとともに, 構造に依存した多様な分極の自由度とそのもとの線形・非線形光学特性を通して, レーザーと物質との相互作用に新たな素過程と機能をもたらす. 本章では, 粒状物質や2次元円柱物質(ロッド), および, それらの集合体をターゲットに用いた新概念の粒子加速や高強度輻射などを例として, レーザーと物質の相互作用における密度制御の重要性を紹介する.

#### Keywords:

high intensity laser, laser-plasma interaction, structured medium, density control, nonlinear optical property, cluster plasma, rod assembly, laser pre-pulse

#### 7.1 レーザーと物質の相互作用と素過程

近年, CPA (Chirped Pulse Amplification) 法の発明[1]による高強度レーザー技術の革新により, 加速電子のエネルギーが相対論領域の高強度レーザーと物質との相互作用を利用した多彩な研究が展開されている[2]. レーザーは密度分布を介して物質と相互作用することから, 相互作用の制御は密度分布の制御に等しく, それはももとの物質が持っている構造とともに, レーザーの高強度成分である主パルスに先行して存在する低強度のプレパルス成分やペDESTAL成分の影響を受けることから, 両者の長時間ダイナミクスを自己無撞着に扱う必要がある. 主パルスの強度に対するプレパルスやペDESTALの強度比をコントラストと呼び, 本小特集もそれに焦点を当てたものである[3,4][図11参照].

そのようなプレパルスやペDESTALにより主パルスに先立って固体表面に生成されるプレプラズマがマクロなスケール長を持ち, そのダイナミクスが長時間であるなら, レーザー核融合の長い研究で積み上げてきた様々な理論の枠組み(逆制動輻射や共鳴吸収, 各種パラメトリック不安定性, 非線形エネルギー輸送や流体運動の自己相似性など)を用いることで評価することは比較的容易にできよう[5]. 一方, 高強度レーザーと物質との相互作用を利用した応用研究の多様化に伴い, 選択するターゲットの自由度も, 気体や固体薄膜を超えて増している背景がある.

上記の観点に立ち, i)同じ固体でも表面が特異な構造を持っていたり, ii)特定の構造を持った微小物質の集合体から成り立っていたりする場合, iii)そのような構造を持った物質が密度の異なった他の物質や相の異なった媒質中に配置されるなど, 多種の物質が境界を通して接している場合の相互作用などについて考察する.

それらが単純な固体(バルク)と異なる点は, 大きな比表面積( $S_m = S/n_{av}V$ )を持つことであり, 表面を通した多様な分極の自由度とそれに起因する線形・非線形光学特性がレーザーとの相互作用に豊富な構造やダイナミクスをもたらす点である. ここで  $S$  はバルク体積  $V$  の持つ表面積,  $n_{av}$  は平均密度である. 接触面が広いことから微小な散逸が大きな吸収率をもたらしたり, 光の捕捉効果を通してメタマテリアル様の構造共鳴を現出したりすることも考えられる. 特にiii)は溶液中における“溶質”と“溶媒”の関係に類似し, 異なった物質の接触面(境界層)に内在する自由エネルギーが多様な構造形成の起源にもなる.

ここでは, それらを“**構造的ターゲット**”として参照する[6]. このようなターゲットは微細構造を持つが故にレーザーのプレパルスやペDESTALの影響を強く受ける可能性がある. 主パルスが到達したときはすでに微細構造が消失している場合も想定される. これは不利に見えるが, 逆にコントラストが制御されれば, 媒質の線形分散特性や光学特性を通して, 主パルスによる非線形相互作用に多様

な自由度を付与する要素となる側面も有している。

本章は、高強度レーザーと構造的ターゲットの基本的な相互作用について、これまで行ってきた研究例を中心に報告する(7.2)。尚、あらゆるプラズマは電離過程を通して生成される。プレプラズマとともに主パルスとの相互作用においても実現するプラズマの密度分布(特に価数分布)は電離過程の影響を強く受けることから、これを考慮した相互作用についても言及する(7.3)。

### 7.2 レーザーと微細構造物質との相互作用

ここでは物質の微細構造がレーザー光の伝播や吸収を中心としたレーザーと物質との相互作用に与える影響について、固体表面に揺らぎがある場合(7.2.1)、およびターゲットが粒状固体やロッドなどの微小物質やそれらの集合体でできている場合(7.2.2)について考察する。

#### 7.2.1 構造的ターゲット：固体表面の揺らぎ

高強度レーザーと構造的ターゲットの相互作用の例として、固体表面に間隔と深さが( $\ell, \delta$ )の正弦波で表される揺らぎを与え、これにP偏光のレーザーを正面照射したときの吸収率を考える(図1左)。揺らぎの深さは( $\delta/\lambda = 0.1$ :  $\delta = 82 \text{ nm}$ )と( $\delta/\lambda = 0.25$ :  $\delta = 205 \text{ nm}$ )の2ケースとして、レーザーの波長と強度は $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$ と $I = 2 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ ( $a_0 = 1$ )とする。ここで、 $a_0 \equiv e|A|/mc^2$ はレーザーの規格化強度である。図1右は吸収率を $\ell/\lambda$ の関数として示している[7]。

吸収率が4%程度の $\ell/\lambda < 2 \times 10^{-2}$ の短波長領域(i)から急速に増大し、 $0.3 \leq \ell/\lambda \leq 3$ の中間領域(ii)では50%を上回る値をとり、 $\ell/\lambda \geq 5$ の長波長領域(iii)では再び減少する。短波長側で吸収率が増大し始める揺らぎの波長( $\ell$ )は深さに依存しないが、長波長側で減少し始める揺らぎの波長は深さに依存し、深いほど長波長側にシフトする。領域(ii)は緩やかなピーク( $\ell/\lambda \sim 0.15$ )と急峻なピーク( $\ell/\lambda \sim 1.0$ )に特徴付けられ、それらは深さ $\delta$ の増大とともに長波長側にシフトする。これは同じ $\ell$ に対しては $\delta$ が大きいほど表面積が増えることによると考えられる。

また、長波長側の急峻なピークは領域(ii)の長波長のエッジに出現し“構造共鳴”の様相を示している。短波長側で吸収率が深さ( $\delta$ )に依存することなく一定値になるのは、P偏光のレーザーに対して表面に沿った電子の運動が

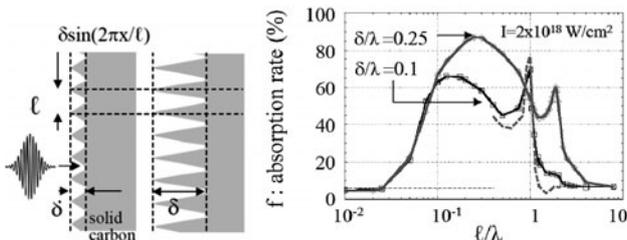


図1 左図：正弦波様の揺らぎをもつ平板ターゲット(間隔： $\ell$ 、深さ： $\delta$ )へのレーザー照射の様子。右図： $\delta/\lambda = 0.1$ 及び0.25の揺らぎを持つターゲットに強度 $I = 2 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ ( $a_0 = 1$ )、パルス長 $\tau_\ell = 40 \text{ fsec}$ 、波長 $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$ を正面照射したときの $\ell/\lambda$ に対する吸収率。点線は $I = 8 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ ( $a_0 = 0.2$ )の場合の構造共鳴近傍の様子[3]。

揺らぎを平坦化することによると考えられる(電子の振動距離 $\xi_e \gg \ell$ )。

図1から、レーザーと揺らぎの波長が等しくなる $\ell \sim \lambda$ の領域を挟み2桁程度のレンジ( $0.05 < \ell/\lambda < 5$ )でレーザーと物質との相互作用特性が大きく変化することが分かる。これは、この領域の微細構造をターゲットに導入することで相互作用に大きな変化をもたらすことができることを示している。図1右の点線はレーザー強度が $a_0 = 0.2$ の場合の結果を示す。これは領域(ii)で出現する構造共鳴現象が線形過程であることを示している。

#### 7.2.2 構造的ターゲット：粒状物質・2次元円柱構造

気体や固体薄膜のターゲットに対し、粒状の固体物質(クラスター)をターゲットにした研究がある(図2参照)。クラスターは高圧にした希ガスを真空中に放出することで生成する[8]。クラスター径 $\phi$ に比べてレーザーによる電子振動距離 $\xi_e$ が十分に大きい場合( $\xi_e \gg \phi$ )、クラスターはクーロン爆発を起こして高エネルギーイオンを生成する[8,9]。次節で説明する円柱状の2次元物質(ロッド)を含め(図2参照)、これらは図1の固体表面の揺らぎの一部と考えれば、レーザーとの相互作用において有用な機能を創出するレンジは平板ターゲットと同様にレーザー波長を挟んで2桁程度と考えられる。このような微小物質は、単体としての特性から、後述の集合体(媒質)としての特性を用いた研究まで多くの応用が考えられる。

7.2.2.1 単体としての特性(1)：クラスターやロッドなどの微小物質の単体としての特性を利用した応用に医療応用などをめざした高エネルギーイオンの生成がある。単純なクーロン爆発を利用したものに対して、近年、CSBA(Convergence Shock induced Blow-off Acceleration)として参照しているクラスターやロッドの内部自由度を利用した準光速領域の陽子加速(200~400 MeV)がある[10]。サブ $\mu\text{m}$ サイズの水素クラスター[11]にパルス長が数10 fsecオーダーで集光強度が $10^{22} \text{ W/cm}^2$ レベルの高コントラストの高強度レーザー[3,4,12]を照射するとクラスター表面に求心衝撃波が生成され、その収縮によって中心に高密度コアが形成される。それと同期したレーザーの相対論的透明化と光圧によるコアの追圧縮、それに伴う爆発(blow-off)によって前方に指向性を持った高エネルギー陽子が生成される(図3)。

この加速に至る一連の動作を実現するには、レーザーの高コントラスト化を含むレーザーのパルス制御が重要である。衝撃波を高効率に駆動するにはレーザーの力積 $\nabla \gamma \delta t$ (動重力×持続時間)を最大化するパルス制御が求められる

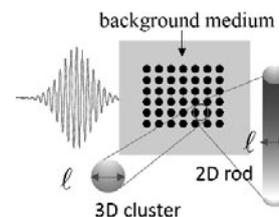


図2 背景媒質がある場合の3次元粒状物質(クラスター)あるいは2次元円柱物質(ロッド)の集合体からなる系とレーザーとの相互作用。

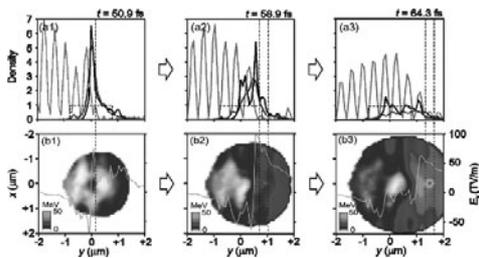


図3 レーザー照射によってクラスター内部に駆動された求心衝撃波とイオン・電子の密度構造（上図）とクラスター内の1次元電場構造とイオンエネルギーの2次元構造（下図）。 $t = 64 \text{ fsec}$ では進行方向に加速された高エネルギーのプロトンパンチが形成される[10]。

る。また、求心衝撃波による密度上昇と相対論的透明化の両者を同期して起こすにはレーザー場と共存するプラズマの表皮長が  $\delta_e \geq L$  (衝撃波の幅) の関係を満たす必要があるが、これを初期のパルス形状のみで制御することは困難である。シミュレーションで見られる複数の素過程の“同期 (synchronization)”が、初期条件で決められる狭いパラメータ領域で起きる現象か、プラズマの自己組織化過程が作用した自律的な現象なのか興味深い。シミュレーションでは、裕度を持ったパラメータ領域でCSBAが動作するとともに、照射の対称性を破る初期条件に対しても十分な加速が実現することから後者の可能性が期待されるが、普遍性のあるメカニズムの解明が望まれる。

**7.2.2.2 単体としての特性(2)：**上述のCSBAは微小物質の内部自由度を利用した例であるが、背景に高圧ガスがあると、7.1で論じたように、境界層に内在する自由エネルギーが新たな構造とダイナミクスを創出する。図4(a)(c)は、背景水素プラズマ中(溶媒)でレーザー照射された2次元炭素ロッド(溶質)の膨張の様子を示している[13]。炭素ロッドが背景ガスを圧縮することで境界層に無衝突衝撃波が形成され粒子加速が起こるとともに、その後、境界層には、位相空間に渦構造を持つBGK波様の運動論的な準定常状態が形成される。図4(b)はBGK波のポテンシャル構造と電子の位相空間分布(渦構造)の様子を示している。この構造は時間とともに急峻化することで衝撃波様のリング構造を形成する。これらは、宇宙における背景ガス中での超新星爆発時に形成される無衝突衝撃波やそれに伴って現出する多様な構造とダイナミクスの起源の解明につながる可能性がある。

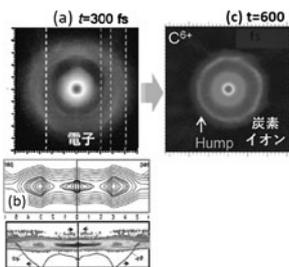


図4 背景プラズマ中でレーザー照射された2次元ロッドの膨張ダイナミクス。(a)  $t=300 \text{ fs}$ での電子分布と(b)境界層で形成されたBGKポテンシャルおよび捕捉された電子分布、(c)その後出現するリング状構造 ( $t = 600 \text{ fs}$ ) [13]。

**7.2.2.3 集合体としての特性(1)：**前述のクラスターやロッドなどの微小物質の単体としての特性に加え、それが集合体となると7.2.1での議論と同様のレンジ(レーザー波長を挟んで2桁程度)において、媒質はマクロには平均密度で定義される一様プラズマの特性を示すが、ミクロにはレーザーによる分極効果を通して、伝播・吸収を中心に、電磁波の線形・非線形光学特性に影響を与える[14]。

図5左は  $\Phi$  (ロッド径)  $\ll \lambda$  を仮定し、配置の依存性を無視した場合のロッド集合体の線形分散関係式を示す[14]。平均密度  $\langle n_e \rangle = p n_e$  ( $p$ : ロッドの空間充填率) が臨界密度より高いプラズマに対し、“禁止帯”を挟み電磁波が伝播する領域が現れる。これは、個々のロッドの分極が復元力として作用することで出現する“分極波”に対応し、プラズマに磁場を印加した場合の磁場の復元力で駆動されるAlfvén波に相当する。反射率は  $n$  を複素屈折率として  $R(\omega) = |(n-1)/(n+1)|$  で評価される。

図5右は平均密度が臨界密度より十分に高いロッド ( $\Phi \ll \lambda$ ) のランダムな集合体に、(a)  $a_0 = 0.1$  および (b)  $a_0 = 4.0$  のレーザーを入射した場合を示す。(a)では図5左の分散に対応してレーザーは臨界密度を上回る高密度の媒質中を伝播・透過しているのに対し、(b)では電子の振動距離  $\xi_e$  が平均ロッド間距離  $d$  より大きくなる ( $\xi_e > d$ ) ことから線形分散が破れ分極波が消失する。このためレーザーは表面で反射される。線形分散が破れるレーザー強度は  $a_0 > 2\pi d/\lambda$  で評価される。

これらの微小物質の集合体とレーザーとの線形・非線形相互作用を利用した様々な応用研究が考えられる。例えば、図5左の分極波 (slow wave) の低周波極限での位相速度は  $\omega/k = c/\sqrt{\epsilon} \sim [f/(f+p)]^{1/2} c < c$  となることから、特定の位相に粒子を乗せることができれば ( $v_x \sim \omega/k$ ),  $v \times B$

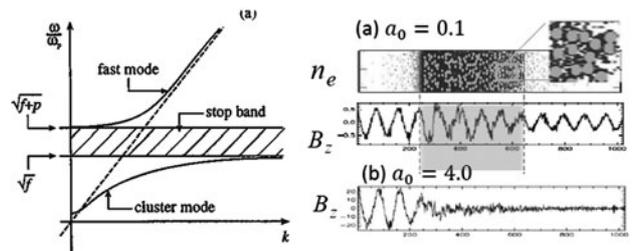


図5 左図：クラスタープラズマの線形分散関係 ( $p$ : 空間充填率,  $f$ : オーダ1の形状因子) [14], 右図：クラスター(半径40 nmの2次元炭素ロッド,  $\langle n_e \rangle = 3.6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ , 充填率  $p = 0.2$ ) に入射されたP偏光電磁波(a)線形領域 ( $a_0 = 0.1$ ), (b)非線形領域 ( $a_0 = 4.0$ )。

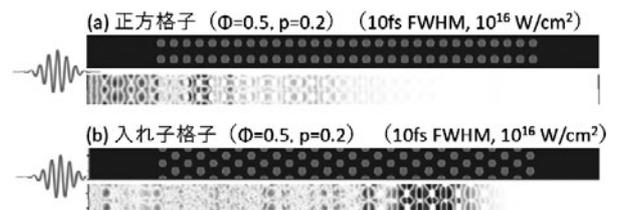


図6 シリコンロッド集合体(直径  $\Phi = 0.5 \mu\text{m}$ , 充填率  $p = 0.2$ ) に入射された極短パルスレーザー ( $10^{16} \text{ W/cm}^2$ ) の伝播の様子。(a) 正方格子の場合, (b) 入れ子格子の場合。

項による直接加速の可能性も指摘されている[14].

一方、図6は入射レーザーの波長オーダーのロッド径 ( $\Phi=0.5\ \mu\text{m}$ ) の集合体にパルス長 10 fsec の低強度のレーザーを入射した場合の結果を示す[15]. 図5左の線形分散は平均密度のみの関数として配置に依存しないが、この領域では「正方格子」配置ではレーザーは伝播しないのに対して「入れ子格子」配置では伝播する(透過率は10%程度). これは微小物質の配置に依存して相互作用が異なることを示し、メタマテリアルの特性に類似している.

**7.2.2.4 集合体としての特性(2):** 微小物質の集合体に対して、図5左に示す線形分散が消失する高強度の非線形領域においても、単純な気体や固体にはない特性が現出し、様々な応用が考えられる. 7.1で論じたように、このような集合体は比表面積  $S_m = S/n_{sv}V$  が大きい特徴があり、これが高強度領域の非線形光学特性に影響を与える. その特性の一つが高いレーザーエネルギーの吸収率である. 図1のような表面に揺らぎを持った固体も比表面積が大きい物質であるが、微小物質の集合体はレーザーが部分的にバルク中に侵入することから比表面積は大きくなり、加熱に関与する粒子が多くなる. これは1粒子(電子)当たりには付与されるエネルギーは低く抑えられることから音速が小さくなり、構造体(集合体)の保持時間も相対的に長くなる特徴がある. 超高強度領域においてロッド集合体と平板固体ターゲットの吸収率や GeV オーダのイオン加速特性の差異が詳細に調べられている[16].

図7は、同じ質量密度の炭素の(i)スラブプラズマ、(ii)半径  $a=160\ \text{nm}$  のロッド集合体に  $I=8.1 \times 10^{22}\ \text{W/cm}^2$  ( $a_0=200$ ) の高強度レーザーを照射した場合の輻射減衰による輻射発生シミュレーション結果を示す[16]. スラブ配位では輻射圧によってレーザー進行方向にプラズマが圧縮されるのに対し、ロッド集合体では、ロッドのクーロン膨張に伴うレーザー照射側への動圧がレーザー輻射圧に抗することでスケール長の長いプラズマをレーザー照射側に生成し、レーザー反射面領域を含む広い領域で強い輻射が生成される. これは、比表面積の大きな物質は、高強度レーザーとの相互作用において、物質を構成するイオン系が保有しているクーロンエネルギーを有効に開放するのに適した系であることを示している.

図8(a)は入射レーザーエネルギーのイオン・電子の運動エネルギーおよび輻射エネルギーへの配分率のレーザー強度依存性を示している. 特に高強度領域では入射レーザーエネルギーの40%が輻射に変換されるなど、輻射生成の観点から構造的ターゲットの有用性が示された.

図8(b)はロッド媒質中での電子軌道の典型例を示している[17]. 電子はロッドの近傍の強いクーロン場による捕獲・散乱を繰り返しながら媒質中をランダムに運動し、そのとき受ける強い加速度が強い輻射を放出する.

このような、微小物質の集合体は、近年、シリコンを中心とした半導体技術を利用した電子線リソグラフィ技術や電気化学・プラズマエッチング技術で作製が可能になりつつあり、筆者等を中心とその研究が進められている. 図9は著者等が作製した直径  $1\ \mu\text{m}$  オーダで長さが  $20\ \mu\text{m}$

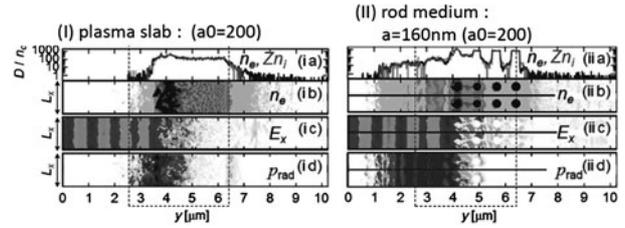


図7 強度  $I=8.1 \times 10^{22}\ \text{W/cm}^2$  ( $a_0=200$ ), パルス長 80 fsec のレーザーの照射された同じ質量密度の (i) スラブ状プラズマと (ii) 320 nm 径のロッド媒質からの  $t=80\ \text{fs}$  での輻射の様子: (a) 1次元電子・イオン密度, (b) 2次元電子密度, (c) 電場  $E_x$ , (d) 輻射強度[16].

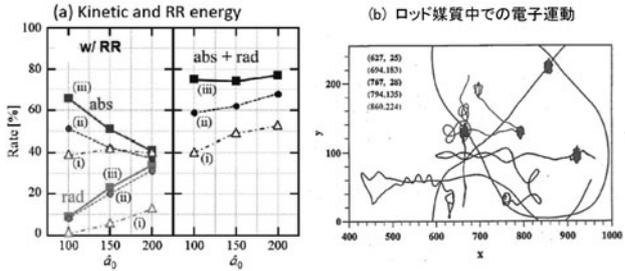


図8 (a) スラブプラズマ (i),  $r_{cl}=320\ \text{nm}$  ロッド媒質 (ii),  $r_{cl}=740\ \text{nm}$  ロッド媒質 (iii) における運動エネルギー (abs) と輻射エネルギー (rad) のレーザー強度依存性 (左図は全吸収エネルギー abs+rad)[16], (b)  $a_0=2$  で照射されたロッド媒質中での5個の電子の軌道[17].

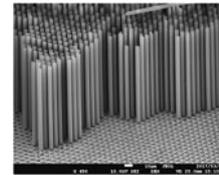


図9 電子線リソグラフィとウエットエッチングプロセスで作製したサブ  $\mu\text{m}$  オーダでデザインしたロッド集合体例[18].

オーダーのシリコンで作成したロッド集合体を示している. 現在、これにレーザーを照射する実験を実施している[6, 18].

### 7.3 電離過程によるプラズマ形成

これまでの例では、シミュレーションを行うに当たっては初期に完全電離プラズマを仮定しているが、プラズマは電離過程を通して生成されることから、特に主パルスに先立つ低強度のプレパルスやベダスタルの効果を評価するに当たってはこれを考慮する必要がある[19, 20].

図10は、強度  $I=3.2 \times 10^{19}\ \text{W/cm}^2$  ( $a_0=4$ ), パルス長 40 fsec (FWHM: full width at half maximum) のレーザーを光学的に透明な炭素(ダイヤモンド)に照射したときの電離ダイナミクスを示す[20]. 主パルス先端の  $10^{12-14}\ \text{W/cm}^2$  の低強度のレーザー成分は炭素薄膜中に侵入すると、その強度が1価( $\text{C}^+$ )の電離強度 ( $\sim 10^{14}\ \text{W/cm}^2$ ) に達するとレーザー場により電離が始まり、光速で伝播するレーザーと運動した電離波となり物質中に伝播する. 時間の経過とともに電離が進行し、薄膜表面近傍の密度が上昇して表皮長 ( $c/\omega_p$ ) が縮小することから、レーザーは遮断・反射さ

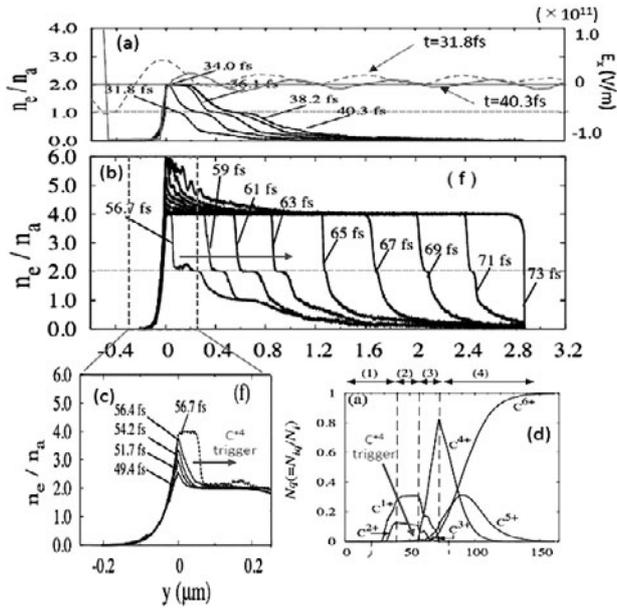


図10 炭素（ダイヤモンド）に強度  $I = 3.2 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$  ( $a_0 = 4$ )、パルス長 40 fsec のレーザーの照射時の (a) 31.8 ~ 40.3 fs、(b) 56.7 ~ 73 fs の電離過程（電子密度）のダイナミクス。(c) 49.4 ~ 66.7 fs は 4 個がトリガーされる前後時間の様子。(d) 各価数の密度変化。C<sup>4+</sup> の電離波が  $t = 56.4$  fs にトリガーされる [20]。

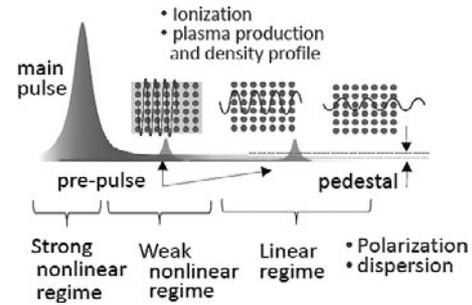


図11 構造的ターゲットとプレパルス成分やペダスタル成分を有する高強度レーザーとの相互作用において、レーザー強度によって媒質の分極・分散特性が変化する様子。

した相互作用特性は時々刻々変化する。図11はその様相を模式的に示している。

この観点から構造的ターゲットは複雑な密度構造をレーザーとの作用前から導入していると言える。このため、電離過程に伴うプラズマ生成過程においてもレーザーの伝播・吸収を中心とした光学特性は単純な気体や固体と異なり複雑になる。この過程で形成された密度分布が実質的な初期値となって高強度の主パルスと相互作用することから、その初期条件を評価する方法論を開拓するとともに、目的に沿った初期条件を与えるためのプレパルスやペダスタルを含めたレーザーパルスの設計が求められる。

れる。

それ以降は、図10(a) (b)に見られるように、急峻なエッジを持った1価、2価、4価の電離波がトリガーされ、薄膜中を光速の1/3程度で伝播する。これら電離波の高速伝播は、電離面に局在したソリトン様の静電波（プラズマ波）によるものである。一方、5価および6価は、図10(b)からわかるように、衝突電離によって拡散的にゆっくりと伝播する。これらのプラズマ生成過程はプレパルスやペダスタル成分が存在することで様相が異なる可能性があることから、それらを取り入れた評価が必要となる。

### 7.4 まとめ

本章では、サブμm オーダの微細構造を持つ物質やその集合体、そのような物質が他物質や相の異なった媒質中に配置されるなど、複数の物質が境界を通して接している物質などを構造的ターゲットとして参照し、これに高強度レーザーを照射することで、これまでの単純な気体や固体薄膜と質的に異なった相互作用と機能について特定な例題のもとに考察した。その背景に、このような物質は、個々の微細な物質内部の自由度や表面に起因する分極の自由度に加え、その集合体を考えることにより、集団的な相互作用に起因する特異な光学特性や多様な構造やダイナミクスが現出する。

この相互作用は照射するレーザーの強度に大きく依存し、低強度では線形分極・分散/線形光学特性、高強度の非線形分極・分散/非線形光学特性に支配される。相対論領域の高強度レーザーパルスであっても、プレパルスやペダスタルを含む主パルスに先立つ低強度成分から高強度領域に変化する過程で媒質中での伝播・吸収特性をはじめと

### 参考文献

- [ 1 ] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.* **56**, 219 (1985).
- [ 2 ] A. Macchi *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 751 (2013).
- [ 3 ] H. Kiriyama *et al.*, *Opt. Lett.* **43**, 2595 (2018).
- [ 4 ] H. Kiriyama *et al.*, *Opt. Lett.* **45**, 1100 (2020).
- [ 5 ] C.S. Liu *et al.*, *High-Power Laser-Plasma Interaction* (Cambridge University Press, 2019).
- [ 6 ] Y. Kishimoto *et al.*, *Generation of self-organized high energy density plasma by the interaction between high intensity laser and structured medium*, The 10th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2017), Sep. 12, 2017, Saint Malo, France.
- [ 7 ] 岡部泰典：京都大学修士論文より（2005年3月）。
- [ 8 ] T. Ditmire *et al.*, *Nature (London)* **386**, 54 (1997), T. Ditmire *et al.*, *Nature (London)* **398**, 489 (1999).
- [ 9 ] Y. Kishimoto *et al.*, *Phys. Plasmas* **9**, 589 (2002).
- [ 10 ] R. Matsui *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 014804 (2019), 松井隆太郎 他：“宇宙線発生の仕組みを利用した新たな加速器の提案”，*Isotope News* 2019年10月号 No.765.
- [ 11 ] S. Jinno *et al.*, *Opt. Express* **25**, 18774 (2017), S. Jinno *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **60**, 044021 (2018).
- [ 12 ] A. S. Pirozhkov *et al.*, *Opt. Express* **25**, 20486 (2017).
- [ 13 ] R. Matsui *et al.*, *Phys. Rev. E* **100**, 013203 (2019).
- [ 14 ] T. Tajima *et al.*, *Phys. Plasmas* **6**, 3759 (1999).
- [ 15 ] 上原直希：京都大学学士論文より（2019年3月）。
- [ 16 ] N. Iwata *et al.*, *Phys. Plasmas* **23**, 63115 (2016).
- [ 17 ] Y. Kishimoto and T. Tajima, *HIGH-FIELD SCIENCE* 83-96 (2000), Proceedings on High-Field Science, held November 23-24, 1998 at the Institute for Laser Science and Applications, University of California, Livermore, California.
- [ 18 ] Y. Kishimoto *et al.*, "Confinement" of High Energy Density

Plasma Based on Structured Medium and initial Experiments Using SACLA X-Rays, A New Platform Studying MCF Plasmas Using Laser (6C08), 11th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2019), Sep. 27, Osaka, Japan.

- [19] T. Masaki and Y. Kishimoto, J. Plasma Fusion Res. **81**, 643 (2005).  
 [20] D. Kawahito and Y. Kishimoto, Phys. Plasmas **27**, 033108 (2020).



きし もと やす あき  
岸本 泰明

京都大学大学院エネルギー科学研究科および非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット。1981年広島大学修士課程修了，1984年大阪大学博士課程修了，日本原子力研究所・那珂研究所（現量子科学技術研究開発機構）を経て2004年より現職。トカマクを中心としたプラズマの乱流輸送やレーザーと物質との相互作用に関する理論・シミュレーション研究などに従事。核融合の実現とともに，プラズマとは「形のないものから形を創出する媒質」との考えに基づいて，物質の電離過程や放電・雷現象なども含め，幅広いプラズマ現象に興味を持って研究を行っています。

(HP:<http://plasma-fusion.energy.kyoto-u.ac.jp/>  
<http://plasma-fusion.energy.kyoto-u.ac.jp/UNIT/index.html>)



まつ いりゅう たろう  
松井 隆太郎

2019年3月京都大学大学院エネルギー科学研究科博士後期課程修了。博士（エネルギー科学）。現在，京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻プラズマ・核融合基礎学分野助教。高強度レーザーと物質の相互作用により生じる極限プラズマ中での多彩な構造とダイナミクス，および，それによるイオン加速メカニズムについて，粒子シミュレーションにより研究しています。プラズマ物理では，個々の荷電粒子（イオンと電子）の電磁場中での動きを追跡するだけでは不十分で，“集団的なふるまい”というマクロな視点で現象を眺めることで理解できるところに面白さがあると考えています。この“集団的なふるまい”については，現象を規定する物理量（自由度）があまりに膨大であるため，まだ知られていない現象がたくさん潜んでいます。大学院在学中に先生方に学んだ，「自然科学に謙虚に向き合う姿勢」を肝に銘じながら，プラズマの“集団的なふるまい”の正体を理解するべく，日々の研究に取り組んでいます。