



講座 はじめてみよう！高エネルギー密度プラズマ計測

2. レーザー生成プラズマ計測の第一歩

2. Introduction to Measurements of Laser-Produced Plasmas

重 森 啓 介

SHIGEMORI Keisuke

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

(原稿受付：2015年10月8日)

高強度レーザーを物質に照射することにより、極めて高い温度・圧力のプラズマを得ることができます。このような状態のプラズマは、照射するパルスレーザー光の時間スケールほどの非常に短い時間内での現象です。この短時間で刻一刻と変化する微小なレーザー生成プラズマは、その性質に則った計測を行う必要があります。この章では、このレーザー生成プラズマの特徴を計測という観点から要点をまとめ、高強度レーザーで生成する高エネルギー密度プラズマの特徴、そしてその計測の概要を示し、この章に続くいろいろな高エネルギー密度プラズマ計測への導入を行います。

Keywords:

high energy density plasmas, resolution, high-intensity laser, ultrafast phenomena

2.1 はじめに

本講座では、高強度レーザーやパルスパワー装置を用いて得られる高エネルギー密度プラズマ計測に関して、次章よりその具体例を通して記述を行います。その前の導入として、この章では全体を通して共通性の高い事項である高強度レーザー生成プラズマ計測の基礎から紹介を始めます。ここで述べるレーザー生成プラズマの計測自体については、その概念・考え方や基本的な手引きがその他一般的な実験の計測と全く違うというわけではありません。ただし、高強度レーザーで得られる高エネルギー密度プラズマは、計測対象として様々な特徴があり、それを念頭に置いて考える必要があります。高強度レーザーやパルスパワー装置による高エネルギー密度プラズマ計測は続く章で具体的に述べられますが、まずはこの高エネルギー密度プラズマに初めて触れる方を想定し、実験を行う前段階としての「準備運動」から始めてみることにします。

2.2 レーザー生成プラズマの特徴

ここではレーザー生成プラズマについて、計測という観点でその特徴を見ていきましょう。レーザーポインターのような比較的弱いレーザーを物質に当てると、その光は反射・散乱をうけ、透明な物質であれば透過します。しかしながら、強度がどんどん上がっていくと、物質表面から電離、すなわちプラズマ化が起こり、そのレーザー光の波長で決定される電子密度の点で強い吸収が起こります。吸収されたレーザーのエネルギーは、電子熱伝導などを介してターゲット方向と外方向に輸送されます。ターゲット内部には強い圧力が衝撃波によって伝播し、外方向にはアブ

レーションとして質量が噴出します。これらがバランスして定常状態になります。

図1に、ごく一般的なナノ秒レーザーを固体ターゲットに照射した場合の、ターゲット深さ方向の密度・温度の空間分布の一例を示します。初期の固体ターゲットは常温であり（左側）、そこに高温で比較的低密度なプラズマ（右側）ができることから、高温で低密度のプラズマが低温で高密度な部分を「押す」かたちとなります。

ここで重要なのは、縦軸と横軸のスケールです。まず温度だけを見てみると、レーザー照射前のターゲットの温度は室温ですが、レーザー照射によって得られるプラズマの温度は1 keV (1000万度) を超える高温状態となります。密度に関しては、ターゲット内部は固体密度であり、アブレーション方向に指数関数的に密度が下がり、後述の通り真空の状態に囲まれています。このように温度・密度の値は10桁以上も隔たりがあることになりますが、横軸の空間スケールはおおよそ1 mm 以下という非常に狭い領域です。すなわち、この極端な状態の変化がごく小さな領域に凝縮していることになります。さらに、この状態はレーザーのパルス幅 ($\sim 10^{-9}$ s) 以下のスケールで刻一刻と変化します。

このような特徴を全く考慮に入れずに何の工夫もなく計測してしまえば、このレーザー生成プラズマは単に「強く光っている小さな物体」としか判断できません。図1はあくまで典型的な例であって、実験の条件によってはこのような理想的な形状のプラズマでない場合もあり、未知の状態であることもしばしばです。すなわち、レーザーの照射条件やターゲットの種類、形状などで無限のパターンを創

Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita, OSAKA 565-0871, Japan

author's e-mail: shige@ile.osaka-u.ac.jp

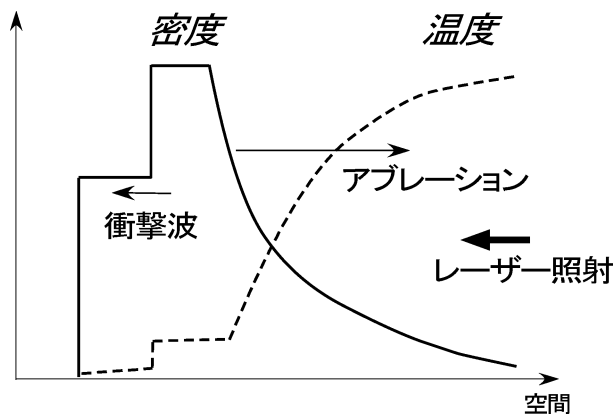


図1 典型的なレーザー生成プラズマの温度・密度構造。

り出し、これを正確に計測するのがレーザー生成プラズマの実験ということになります。このバラエティに富んだ条件下での微小な速い変化を追うことが、レーザー生成プラズマ計測にあたって困難な点であると同時にチャレンジングな研究テーマと言えます。

2.3 レーザー生成プラズマをどう測るか？

このような小さくて速く変化するレーザー生成プラズマがどのような物理量を持つのか、という答えを実験的に得るためには、その小さい・速いという特徴から紐解くことが必要になります。まず「小さい」というところに対応するのはプラズマの微小な空間方向の分布を得ることです。すなわち、ある物理量を空間の関数として得ること、言い換えると空間方向に情報を「分解」して計測することになります。プラズマのサイズが小さいことと同じように、その時間変化が速いことも考慮すると、時間方向にも情報を分解して計測しなければならないことになります。

これらレーザープラズマの基本的な特徴を得たうえで、もう少し情報量が欲しくなるかもしれません。プラズマからの発光の波長の分布を求めたいのであれば、波長方向に情報を分解する必要があります。また、発生する電子などのエネルギーの分布を得たいのであれば、同じようにこれらを分解して計測することになります。図2にレーザー生成プラズマ計測の概念図を示します。空間分解を行う場合、それはすなわち像 (Image) を得ることになります。このためには、例えば可視光であればレンズなどの光学系が用いられます。時間分解については様々な手法がありますが、プラズマからの電流を電気信号としてオシロスコープで測るようなものが挙げられます。波長分解については、プリズムなどの分光器を用いることが考えられます。こういった連続したある物理量を「定量的」に得ることは、計測全般として重要な課題となります。

もう一つここでポイントになるのは、上記のうちのひとつのみの分解 (計測) を行っても、多くの場合はそのレーザー生成プラズマの情報量として十分でないことです。例えば、プラズマの発光の綺麗な像 (2次元像) をレンズなどによって得たとしても、時間分解ができていなければレーザー照射中のプラズマの変化はわかりません。すなわち「時間積分」の像となり、レーザー照射の最初から最後

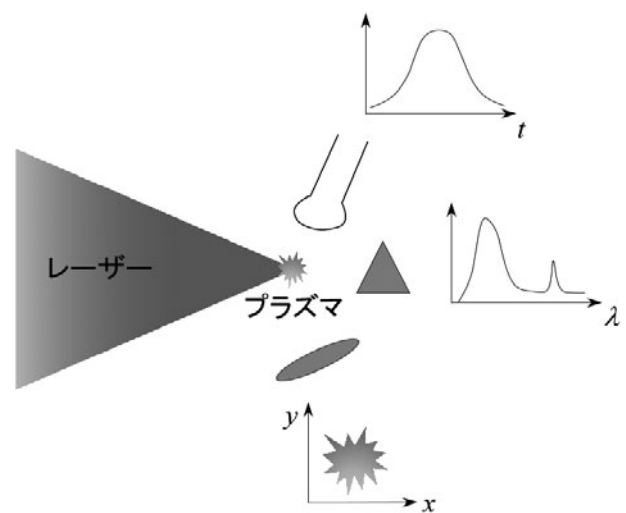


図2 得たい情報によって物理パラメータを「分解」して計測するいくつかの例。上より時間分解、波長 (スペクトル) 分解、空間分解。

までの積算した値となるため、いくら素晴らしい空間分解計測を行ったとしても、時間変化が激しい条件であれば無意味なデータとなります。これを解決するために、空間分解と時間分解の両方の機能をもった計測法・計測器を適用したり、複数の計測器を同時に使用することによって情報を多面的に取得するアプローチが取られます。

なお、ここで空間分解や時間分解などの性能を示す指標は「分解能」と定義されます。測りたいプラズマの時間・空間変化のスケールなどと比べて、この分解能が十分に小さいことが必要条件となります。そうでなければ、分解能の悪い「ぼやけた」結果になります。レーザー生成プラズマは小さくて速い変化を示すがゆえに、適正な分解能をもった計測系を使用することが必須であり、さらにこの分解能を上げることが計測という観点では最も重要な研究課題の一つになります。

2.4 レーザー生成プラズマの実験環境

次に上記のようなレーザー生成プラズマの実験環境を見てみましょう。ここではごく典型的な例：高強度レーザーを集光レンズで固体ターゲットに照射し、プラズマを生成する実験を想定します。実験に関してまず留意しなければならないことは、ターゲットは真空中でレーザーに照射されることです。高エネルギー密度状態のプラズマを生成するような高強度レーザーはすなわち強い電場をもつ電磁波であるので、大気中で集光するとブレイクダウン (絶縁破壊) を引き起こし、ターゲット上に集光するまでにエネルギーを失ってしまいます[1]。このため、実験には真空容器がハードウェアとして必要となります。この真空条件下での実験環境というのが、計測技術のポイントになります。

図3に大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの激光XII号の照射用真空容器の写真を示します。真空容器に関しては、計測だけでなくレーザー光の集光に関しても考慮に入れないといけないため、その大きさや形は装置に

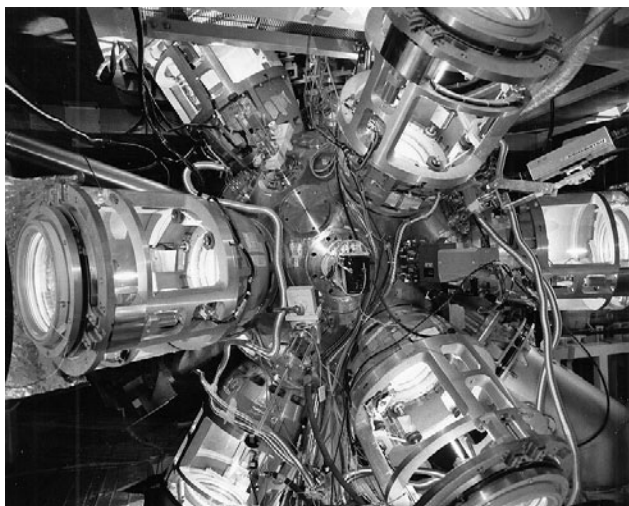


図3 大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの激光 XII 号のターゲット照射用真空容器（ターゲット室 I）。

よって様々です。この写真の真空容器の場合、激光 XII 号の12本のビーム（直径 30 cm）が正12面体に照射される配位になっているため真空容器は球状となり、焦点距離や入射レーザーのビームサイズでその大きさがほぼ決まってきます。この真空容器の中心にレーザー光が集光し、プラズマが生成します。真空容器の大きさは直径約 2 m 弱です。写真にある計測器用のフランジに計測器を装着し、約 1 m 先のプラズマを観測することになります。この真空容器はかなり大きいように感じますが、米国ローレンスリバモア研の NIF（国立点火施設）の真空容器は直径が 10 m という更に巨大なものです[2]。

この真空中で得られる高エネルギー密度プラズマは、前述の通り「微小な」ものであるため、空間分解計測（像計測）を行う際は、この環境下で像を拡大することを念頭に置く必要があります。ここではまず、可視光を計測することを考えてみます。像を拡大するやり方として、顕微鏡と望遠鏡の2つがあります。顕微鏡は近くの微小なものを拡大する、望遠鏡は遠くの大きなものを拡大するという役目がありますが、レーザー生成プラズマの計測の場合はどうでしょうか？ 計測となる対象物は夜空の星ほど遠くにあるわけではありませんので、レーザー生成プラズマの直近に顕微鏡のようにレンズを置きたいところですが、生成するプラズマやデブリ（破片）の影響があるため、あまり近くに置くとダメージが入ってしまいます。ターゲットとの安全な距離は装置に依存するところがありますが、焦点距離の短い顕微鏡用の対物レンズを置くのは一般的に難しい距離です。よって、ある安全な距離において最初の結像レンズを置くことになります。このレンズで結像された像をさらに別のレンズ等で計測器（検出器）まで転送するのが一般的です。

上記は光学計測の場合ですが、X 線などの場合も同様で、結像系をどこにどのように配置するのがポイントになります。X 線の場合、その扱いやすさと構造の簡便さから、ピンホールがよく使用されます。また、画像計測（空間分解計測）のほかに、波長分解（スペクトル分解）を行

う場合もあります。この際はレンズやピンホールの代わりに、分光器（結晶、回折格子、プリズムなど）を用いることになります。レーザー生成プラズマにおいては、可視光や X 線などの電磁波以外にも荷電粒子や電子、中性子なども計測対象になります。その場合も、「像」として計測を行うのであれば考え方は同じです。

これら必要な光学系の一部（または全部）は真空容器中に配置されます。正確な光軸調整（アライメント）を行うために、固定だけでなく調整のための駆動機構を備える必要があります。これらの調整は真空中で行う必要な場合があれば、大気中で調整を行った後に真空引きを行う場合があります。これらの手順も考慮の上、実際に必要な機器を設計・設定することが重要です。

2.5 レーザー生成プラズマの計測法と計測器

レーザー生成プラズマは、密度・温度の高い領域では可視光や X 線などの発光量（放出量）が十分に多いため、それらを直接計測することによって必要な物理量を得ることができます。レーザー生成プラズマより放出されるのは、可視光や X 線などの電磁波のほか、電子やイオン、中性子などの粒子もあり得ます。これらの直接計測のみで得られる物理パラメータとしては、プラズマの温度・スペクトルなどが代表例として挙げられます。このような計測法は自発光計測、また後に説明する計測法との対比で受動的計測と呼ばれることがあります。

一方で直接観測が難しい状態、すなわち比較的低温または低密度状態のレーザー生成プラズマを計測しようとする場合、そのプラズマ自身からの直接計測では、十分な信号量が得られない場合があります。このような場合に威力を発揮するのが能動的計測です。図4に典型的な配置図を示します。計測対象のプラズマとは別に光源を導入し、その光源とプラズマを相互作用させることによりプラズマの物理量を計測するものです。

この手法は、レーザーでプラズマを生成（ポンプ）し、別の光源で測る（プローブ）ということで「ポンプ・プローブ法」と呼ばれます。計測対象となるプラズマのパラメータや物理量の種類によって、プローブの種類は様々です。プローブ源としては、レーザーのような可視光のほかにも X 線や粒子線などが用いられ、その相互作用に関しても反射や散乱、吸収などが挙げられます。このポンプ・プローブ計測は、前述のプラズマからの放出物を利用した計測との対比から、能動的計測と呼ばれることがあります。得たいプラズマのパラメータによって組み合わせ方が非常に多く、この選択や利用する相互作用をうまく考えるとところが計測の難しいところであり、逆に新しいアイデアを大いに発揮できる部分でもあります。

図4のポンプ・プローブ計測の例では、プラスチック薄膜ターゲットにレーザー光を照射して加速させ、その軌跡を観測する配置を示しています。この実験の場合、観測したいターゲットの横に金属ターゲットを配置し、両方のターゲットに同時にレーザー光を照射することにより、金属ターゲットから発生するレーザープラズマ X 線を「ブ

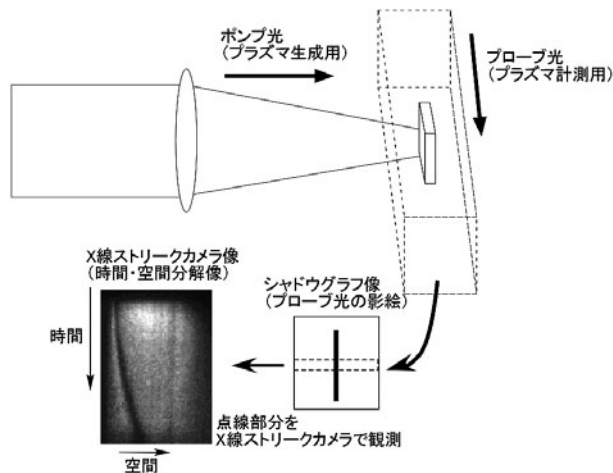


図4 ポンプ・プローブ計測の一例。プローブ光をX線としてターゲット平板を加速させた場合の影絵像をX線ストリークカメラで計測したときのデータ例（空間1次元，時間分解計測）。

ローブ」そして使用します（図では詳しく書いていませんが、ちょうどプローブ光の上流側に金属ターゲットが置かれていると想像してください）。ここではX線をプローブ光としていて、そのプローブ光X線をプラスチック薄膜が吸収するという相互作用を利用しています。すなわち透過率の高い＝密度の薄いプラズマはX線強度が高く、逆に透過率の低い＝密度の濃いプラズマは強度が低くなるため、ちょうど「影絵」を観測していることになり、その影絵の位置からターゲットの位置を得ようとするものです。

ここではレーザー照射によって加速する状態、すなわちターゲット位置の時間変化を得ようとするのが目的であり、そのまま透過X線像をX線フィルムなどで計測してしまうと時間積分像になってしまうため、まったく意味をなしません。前述の通り、観測するプラズマは非常に短い時間スケールで変化するため、その変化を追うためには時間分解計測が必須です。よって、計測器（検出器）自体に時間分解機構を持たせる必要があります。観測対象となるプラズマの時間変化を考慮し、十分な時間分解能を持たせることが重要です。時間分解機構に関しては、その手法も様々です。図4の場合、影絵となる一部分（点線の部分）をX線ストリークカメラによって計測します。レーザープラズマのような速い現象の場合はストリークカメラを用いた計測が有効です（ストリークカメラに関しては参考文献[3]に詳しい）。プラスチックターゲットを透過する方向にX線ストリークカメラを配置し、この透過強度信号をスリットやピンホールで拡大してX線ストリークカメラの光電面に結像します。これに時間掃引をかけることにより、空間1次元の時間分解計測データが得られることになります。すなわち横軸：時間、縦軸：空間（距離）という情報を得ることが出来ます。

以上はストリークカメラを用いた方式ですが、ストリークカメラなどを使用せずに時間分解計測を行うことも出来ます。上述の通り、ポンプ・プローブ計測ではポンプ光に対するプローブ光のスペックを自由自在に変えることが出来ます。そこで、ポンプ光で得られるプラズマの時間変化

に比べてプローブ光の時間幅を非常に短くすることにより、プローブ光の時間幅・タイミングにおける瞬間的な状態（スナップショット）を得ることが出来ます。この場合、1回の実験で1つのタイミングでしかデータが取れないという難点はあるものの、高価な時間分解計測器が不要であることから、繰り返し頻度の高い装置での実験では有効な手段になります。近年ではフェムト秒クラスの超短パルスのプローブ光源が使用できる環境にあるため、時間分解計測器を用いるよりも高い時間分解能を得ることが出来ることから、ポンプ・プローブ計測の新たな主流になりつつあります。

2.6 データの取得と解析

以上のような実験・計測を行い、実際に「データ」として結果を取得しなければなりません。すなわち記録装置が必要となります。ひと昔前は写真（画像）をフィルムで記録していましたが、いまやデジタルカメラやスマートフォンで写真を撮影する場合には、CCDなどの記録デバイスを用いることが一般的です。これは実験現場でも同様で、電子的な記録デバイスが主流となっているため、データはデジタルデータとして保存されます。電子デバイス以外で「生き残っている」貴重な例としては、イメージング・プレート[4]やCR-39などの固体飛跡検出器[5]が挙げられます。これらも読み取り装置を介して最終的にはデジタルデータとして保存され、数値データとして解析されることになります。

ここまで書くと、データ取得はとても簡単で、解析もパソコン上でサッと出来てしまうように錯覚してしまいがちですが、このデータ取得から解析は実験全体の「締め」のところであり、ここが研究そのものの価値を決定するところです。解析自体はここで述べる内容ではありませんが、ポイントとしては実験で得られるデータを見ながら「解析に値するデータかどうか？」を常に考えながら計測を行うことが必要になります。解析に値しないデータであれば、修正を加えて計測をやり直すという流れが作れば、実験の成功率が増すことになります。

もう一つ最後に付け加えなければいけないことは、データの取得とともに、実験条件などの記録をきちんと付けておくことです。いわゆる実験ノートを作成することであり、「手で書く」紙ベースのものにしてしまうと、いつでも手元に取って記録が書ける・見られる媒体を持てることになります。以上のいくつかの点は、一般的な実験でも当てはまる内容です。

2.7 まとめ

この章では、レーザー生成プラズマの計測に関して、レーザー生成プラズマ特有の性質や計測上の考え方、ハードウェアに関する概説を行いました。計測対象となるプラズマの大まかな性質や計測上のポイントを述べました。最初にも記した通り、計測の基本的な考え方としては他の実験と大きく変わることはありませんが、レーザー生成プラズマの場合は（何度も記しているように）小さくて速い現

象なので、我々の肉眼や行動の時間スケールとかけ離れた領域にあることから、「実験」を行っても「実感」できないところが少し苦しいところです（筆者自身、レーザー生成プラズマのリアルタイムの変化を肉眼で見たことがありません）。次の章からは、具体的な実験の例を通して高エネルギー密度プラズマの実像に迫り、より「実感」に近い状況を考えてみましょう。

参考文献

- [1] 山中龍彦：プラズマ・核融合学会誌 69, 656 (1993).
- [2] <https://lasers.llnl.gov/about/how-nif-works/beamline/target-chamber>
- [3] http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/SHSS0006J_STREAK.pdf
- [4] http://fujifilm.jp/business/healthcare/digital_xray_imaging/fcr/imaging_plate/
- [5] 金崎真聡 他：プラズマ・核融合学会誌 88, 261 (2012).



しげ もり けい すけ
重 森 啓 介

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・准教授。高エネルギー密度科学およびレーザー核融合の実験的研究に従事。家族とウサギとともに暮らしています。草食動物は決して肉食動物に変わらないことをウサギから学んでいる今日この頃。