

## ● 高エネルギー密度新物質とプラズマフォトリクスの可能性

高出力レーザー技術の進展に伴い、非常に高いエネルギー密度の状態に関する研究が盛んに行われようとしている。これに関連して、高エネルギープラズマフォトリクスという新しい概念が著者らにより提案された。高エネルギー密度プラズマの性質を利用して、高強度の光や高エネルギー密度荷電粒子を直接制御するもので、新たな光量子ビーム源となる極限的なデバイスを目指している。一方、高出力レーザーによってスーパーダイヤモンドと呼ぶべき極超高压新物質の創成が現実味をおびてきている。高エネルギー密度科学における我が国独自の展開として、この2つの異なる学術を融合させた新しい可能性を探究している。

### 1. 高エネルギープラズマフォトリクス

光や荷電粒子のエネルギーフラックスを上げていくと、光学素子をはじめとする制御デバイスそのものが固体からプラズマの状態に変化し、デバイスにいわゆる損傷や破壊が生じる。ところが、高エネルギー密度プラズマそのものを制御して素子として利用することにより、固体デバイスの機能を維持、もしくはそれ以上の性能が期待できることが明らかになった(Kodama et al. Nature 2004)。これにより、高エネルギーフラックスの光や荷電粒子ビームを直接制御したり、装置の極小化を実現したりする可能性が示されている。この新しい概念のもと、高エネルギープラズマデバイスの研究開発を独自に進めている。

#### 1-1. 新規テラヘルツ光源とEUVデバイス開発

高強度超短パルスレーザーの基本波とその二倍高調波を、ガスターゲットに集光すると、ガスのプラズマ化に伴って生成された自由電子が、レーザーの電場により加速され、準直流電流を形成する。ここでは、その準直流電流により励起されるテラヘルツ波の発生に関して実験を行った。レーザー集光点付近で生成されるフィラメントから発生するテラヘルツ波の最大値はおよそ $1\mu\text{J}$ に達した。また、レーザーの基本波と二倍高調波の位相差を変化させ、テラヘルツ

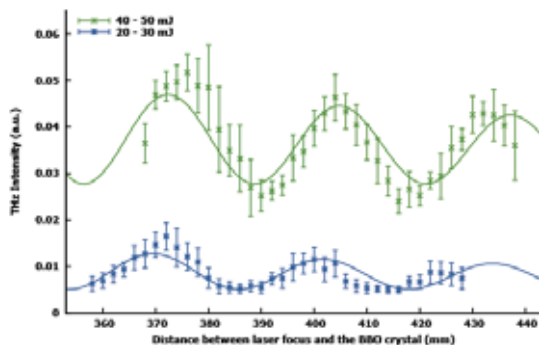


図1. 基本波と2倍高調波の位相差に対するテラヘルツ強度

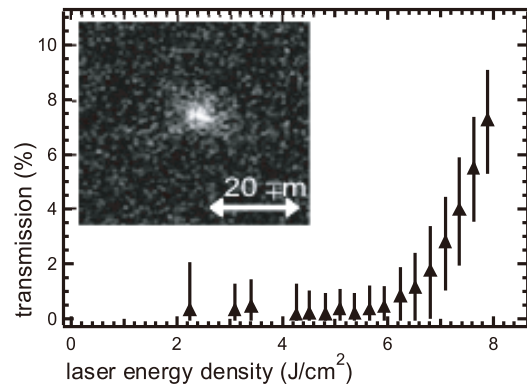


図2. スズのEUV光透過率に対するFELエネルギー密度依存性

波の強度を調べた。図1にその結果を示す。テラヘルツ波の強度は $\sin 2\theta$ に比例することが明らかとなった。今後は本方式を用いてより高強度のテラヘルツ波発生を目指すと共に、高強度テラヘルツ波を用いた物性研究への応用を試みる。

X線回折、散乱などは電子デバイス診断をはじめとする物性診断に広く用いられている。近年、EUV-X線領域における自由電子レーザー(FEL)の開発が進められており、その高い輝度と高い光子エネルギーから様々な分野への応用が期待されている。ここでは、その自由電子レーザーの高品質化あるいはその特性評価のために有用な、非線形光学現象についての研究を行った。実験ではSPring-8のXFEL試験加速器からのEUV-FEL(波長51nm、エネルギー $10\mu\text{J}$ )を集光径 $5\mu\text{m}$ (図2内挿図)で固体のスズに照射し、FELの集光エネルギー密度に依存する透過率の計測を行った。その結果、入射エネルギー密度が上昇するに従って、透過率が急激に上昇することが明らかとなった。これは、スズの束縛電子がEUV光により励起され吸収端がシフトし、飽和吸収が起きたためである。この非線形現象はEUV領域、ひいてはX線領域のパルススライサーやオートコリレータへの応用が期待される。

## 2. 高エネルギー密度高圧物質創成

物質を加圧して最外殻電子が非局在化すると、常温常圧で絶縁体の物質においても金属化が促される。衝撃波を用いたパルス圧縮法では、鋭い立ち上がりで加圧が行われ、且つその後圧力・温度の急激な減衰を伴うので、物質高圧相がしばしば凍結される。高強度レーザーを用いた衝撃圧縮法では、従来法では実現できないさらに高い圧力を生成できるだけでなく、ps-fsの極めて急峻な特殊パルス反応場が形成され、これ迄検討され得なかった極超高圧相を凍結できる可能性が見いだされている。

### 2-1. 低エントロピー圧縮

物質の初期圧力・密度を増加させてレーザー駆動の圧力パルスを入射させると、変化させない場合に比べて低エントロピー状態の(温度が低い)超高圧物質相を探索することができる。本研究室では、従来よりも2-3倍高い静水圧力を生成する予備圧縮セルを開発し<sup>[3]</sup>、このセルにレーザー衝撃波を駆動するハイブリッド法の有効性を実証した。

ハイブリッド法は、気体や液体など圧縮しやすい物質に対して非常に有効であるが、常温常圧で固体の物質には適用できない。そこで、等エントロピー的に物質を極超高圧まで加圧する方法論の確立を行った。レーザー等エントロピー圧縮法によれば、通常の動的圧縮曲線とは全く異なる極めて低い温度領域において、状態方程式、動的弾性・塑性、相転移など、これまで実現不可能であった新しい物質状態を調べることができる。緩やかな密度・速度の勾配を持った“レーザープラズマローダー”を試料に衝突させる等エントロピー的圧縮法によって、圧力標準物質であるプラチナと金の等エントロピー圧縮に成功した<sup>[4]</sup>。

### 2-2. 先進その場計測:炭化水素化合物の金属相転移、超高密度炭素からのX線散乱など

レーザーによる衝撃圧縮は短時間の動的圧縮であり、極超高圧状態はナノ秒の瞬間的にでしか実現されない。そこで、極超高圧状態が実現されている間に状態を計測し、計測したデータをもとに物質状態(状態方程式など)を推定する必要がある。このような診断技術によって、例えば状態方程式などを明らかにすることができれば、どのような圧縮プロセスによれば未知の物質状態に到達させ得るのかななどを予測可能となる。ここでは、マルチチャンネル速度干渉計(VISAR)と放射輝度温度計(SOP)を組み合わせた高速計測システムによって、レーザー衝撃圧縮された炭化水素化合物の導電性流体相転移を観測することに成功した<sup>[5]</sup>。また同様の実験方法によっ

て、液体水素の液体金属相転移を観測し、同位体効果が状態方程式データに及ぼす影響を世界で始めて示した<sup>[6]</sup>。

新しい診断技術として、高輝度パルスX線をプローブした計測法に対する期待が高まっている。例えば、高密度の物質中の電子によって散乱されたX線のスペクトルを計測し解析することで、電子温度、電子密度、電離度を診断することができる。ここでは、X線トムソン散乱計測法の有用性を検証するために、高密度ダイヤモンドからのX線散乱計測実験を行った。低エネルギー側に非弾性散乱に起因するピークを確認され、レーザー衝撃圧縮下のダイヤモンドにおいて自由電子が生成されていることが示唆されている<sup>[7]</sup>。また、レーザープラズマデバイス光源を用いた吸収ラジオグラフィによる超高圧鉄のレントゲン写真<sup>[8]</sup>(図3)や、銅の高速X線回折<sup>[9]</sup>、炭素フォーム材料のプロトンイメージング(図3)<sup>[10]</sup>などにも成功している。将来的には、これらの先進プローブを統合して、多角的、多スケール、高精度の計測と新物質探索を実現する唯一無二の実験研究を展開する。

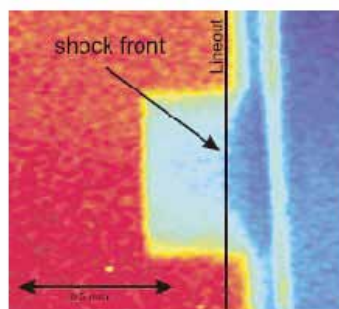


図3. 鉄中を伝搬する衝撃波のパルス硬X線ラジオグラフィ

### 研究成果

- [1] Y. Inubushi et al., Rev. Sci. Instrum. (in press).
- [2] T. Kimura, N. Ozaki, T. Okuchi et al., Phys. Plasmas 17, 054502 (2010).
- [3] K. Miyanishi, N. Ozaki, E. Brambrink et al., J. Physics 215, 012199 (2010).
- [4] N. Ozaki, T. Sano, M. Ikoma et al., Phys. Plasmas 15, 060701 (2009).
- [5] T. Sano, N. Ozaki, S. Shigemori et al., submitted to Phys. Rev. Lett. (2009).
- [6] T. Jitsui et al., FRN-JPN Workshop on High Energy Density Science, Paris, 2010 (invited).
- [7] E. Brambrink et al., Phys. Plasmas 16, 033101 (2009).
- [8] E. Brambrink, Physical Review E 80, 056407 (2009).
- [9] B. Loupius et al., Laser and Particle Beams 27, 601 (2009).
- [10] W.J. Murphy et al., J. Phys. 22, 065404 (2010).
- [11] A. Ravasio et al., submitted to Phys. Rev. E. (2010).