

図2は、レーザープラズマカソード実験においてガス中に照射したレーザープロファイルとそれにより形成されたプラズマジェット及び発生した電子を示す。(a), (b), (c)はそれぞれ空間的に対称なレーザーパルス(照射した場合のレーザー・プラズマ・電子を、(d), (e), (f)は非対称なレーザーパルス(照射した場合のレーザー・プラズマ・電子を示す。図2から、プラズマジェット及び電子パンチの発生はレーザーの空間プロファイルに明確に依存することがわかる。従って指向性・再現性のある電子を発生させるためには、よく定義された空間プロファイルをもつレーザーパルスの照射によってプラズマダイナミクスを制御する必要がある。そこでレーザーシステム内のプリアンプ出力後に空間フィルター1を、メインアンプ1出力後に空間フィルター2を開発して、レーザーの空間プロファイルをガウシアンに近づける。

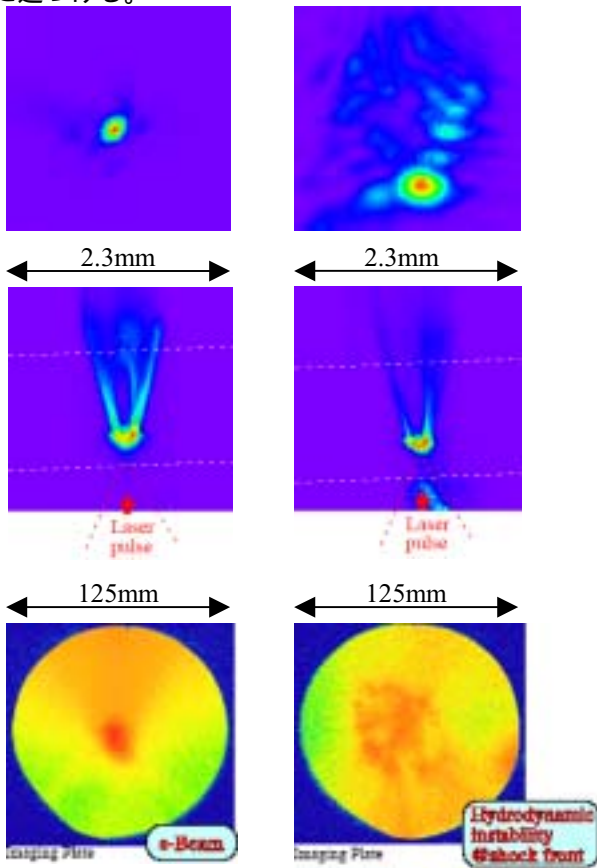


図2 空間的に対称なレーザーパルス(a)照射による対称なプラズマジェット(b)と指向性の良い電子ビーム(c)、及び空間的に非対称なレーザーパルス(d)照射による非対称なプラズマジェット(e)と指向性の悪い電子ビーム(f)

3. 空間フィルター1の設計

空間フィルターとは、フーリエ光学素子でありレーザー空間プロファイルの高周波成分を除去する効果がある。12TWレーザーシステム内のプリアンプ出力後のレーザーパルス(エネルギー35mJ/pulse, パルス幅300ps, ビームサイズ2mm)に対して空間

フィルター1を開発した。図2に空間フィルター1光学系概略図を示す。2枚の集光レンズ($f=452\text{mm}$)を用いてピンホール出口穴($\phi=0.2\text{mm}$)中心部に集光し、ピンホール透過後の回折光を平行化した。集光点における強度は $6.8 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$ に達し大気中ではプラズマ化を起こしてしまうため、ピンホールは真空チェンバー内部に設置した。数値計算結果によると、市販されているピンホール形状の空間フィルターを用いた場合、ピンホール上での集光強度は最大 $4.9 \times 10^9 \text{W/cm}^2$ に達し損傷の恐れがある。一般にピンホールの損傷閾値は、表面の面精度に依存するため知られていないが、誘電体ミラーの損傷閾値の $\sim 10^{11} \text{W/cm}^2$ を参考に、目標値を 10^9W/cm^2 以下と定めた。集光強度を1桁以上落とすため、テーパ形状のピンホールを用いてレーザーの照射される面積を稼ぎ、 $2.8 \times 10^8 \text{W/cm}^2$ に抑えた。

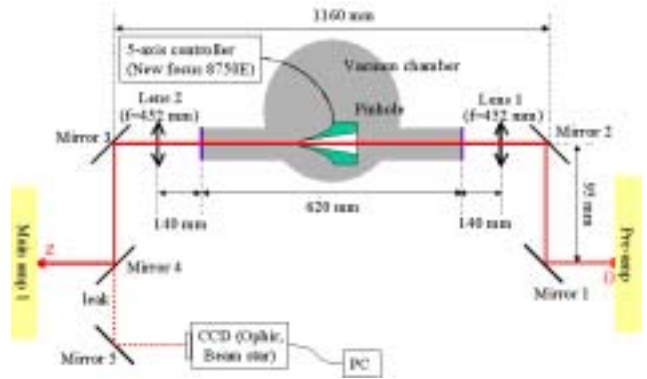


図2 空間フィルター1光学系概略図

レーザーパルスの空間プロファイルは2枚目のレンズ後にCCDカメラを設置して計測した。図3に空間フィルター透過前(a)と透過後(b)の空間プロファイルの比較を示す。非対称な楕円形であったレーザープロファイルが空間フィルターを透過することにより対称な円形のプロファイルに整形された。ガウス関数との相関は、透過前の約79%に対して、透過後は約97%に向上した。またエネルギー透過率は約80%であり、約20%の損失があるが、下流の増幅器により飽和増幅まで増幅されるため問題ない。

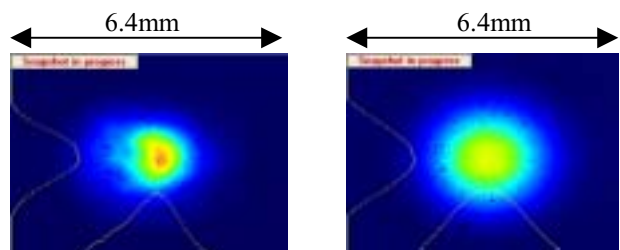


図3 SF透過前(a)と透過後(b)の空間プロファイル

4. 空間フィルター 2 の設計

空間プロファイルの更なる向上のため、レーザーシステム内のプリアンプより下流にあるメインアンプ内のレーザーパルス(エネルギー600mJ/pulse, パルス幅300ps, ビームサイズ20mm)に対して空間フィルター 2 を開発する。レーザーの空間プロファイルがガウス分布に従うと仮定すると、焦点での集光強度は $1.6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ となり空間フィルター 1 への入力より3桁大きい。この集光条件に対してプリアンプ出力後の空間フィルターと同様に、直径が回折限界(20 μm)のピンホールを用いると、ピンホール内部壁での集光強度は最大 $6.1 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ に達し損傷の恐れがある。例えば直径が回折限界の3倍(60 μm)のピンホールを用いると、表面での集光強度を約 $7.9 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ に抑えることができる。しかしながら実際のレーザーの空間プロファイルは高周波成分を含んでおり、ピンホール内部壁での集光強度はガウス分布と仮定した場合より高くなり、損傷の可能性が高くなる。図4は、プリアンプ出力後のレーザーを空間フィルター 2 への入力として、回折限界の1倍、3倍、8倍のピンホールを用いた場合の出力プロファイルの数値計算結果を示す。また、表1は各々のピンホール径におけるエネルギー透過率とピンホール内壁での最大集光強度の数値計算結果を示す。ピンホール径を回折限界の8倍にとっても集光強度が目標値の 10^9 W/cm^2 を超えた。つまり、空間フィルター 1 による空間プロファイルの整形が必要不可欠であることがわかった。また、ピンホール径を回折限界の3倍にとる場合、ピンホール内壁での集光強度を 10^9 W/cm^2 以下にするためには、集光レンズの焦点距離を452mmから1120mm以上へ変更する必要があることもわかった。

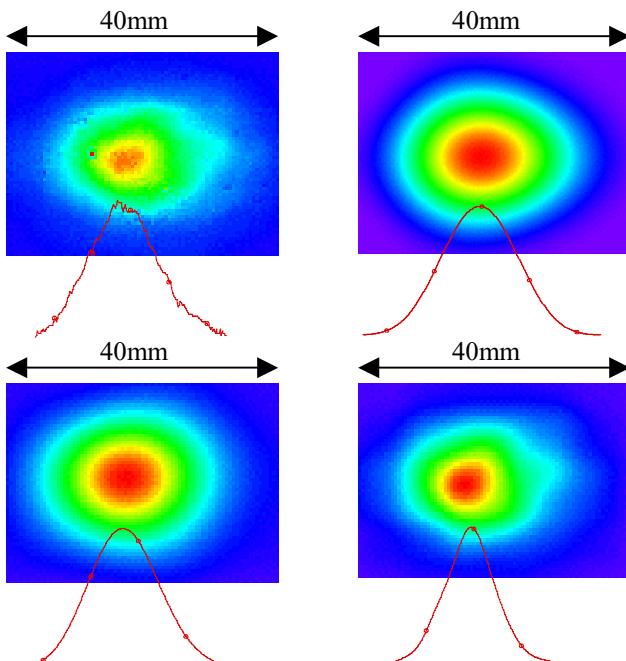


図4 プリアンプ出力後のレーザー(a)を入力として回折限界の1倍(b)、3倍(c)、8倍(d)のピンホールを用いた場合の出力プロファイル(数値計算結果)

ピンホール径/回折限界	1	3	8
透過率[%]	87.7	95.7	98.7
ピンホール内壁での集光強度 [W/cm^2]	1.1×10^{11}	6.1×10^9	1.7×10^8

表1 ピンホール径/回折限界に対するエネルギー透過率及び集光強度の関係

5. まとめと今後の予定

12TW-50fsレーザーシステム内のプリアンプ出力後で使用可能な空間フィルター 1 の開発を行なった。その結果、空間プロファイルのガウス関数との相関は設置前の79%から97%まで向上し、エネルギー透過率は約80%であった。ピンホールの損傷を防止するため、形状をテーパ形状にして内壁での集光強度を $2.8 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ に抑えた。また更なる空間プロファイルの向上のため、システム内のメインアンプ内に空間フィルター 2 を開発している。入力プロファイルに高周波成分を多く含む場合、ピンホール内壁での集光強度は $6.1 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ に達するため、空間フィルター 1 による空間プロファイルの整形が必要不可欠であること、 10^9 W/cm^2 以下にするためにはレンズの焦点距離を452mmから1120mm以上のもに換えなくてはならないことがわかった。今後、空間フィルター 2 への入力プロファイルの測定を行ない、最適な体系を組む。

2つの空間フィルターの設置後は、整形された空間プロファイルをもつレーザーパルスを用いてレーザープラズマカソード実験を行ない、空間フィルターの効果を評価し、プラズマダイナミクスと電子発生との相関及び加速機構の詳細を明らかにする。そして指向性・再現性の向上した電子バンチを用いて、フェムト秒X線を発生させる予定である。

[1] T. Hosokai, K. Nakajima, A. Zhidkov, et al, Phys. Rev. E. 67, (2003) 036407

[2] 山岡宣章, 細貝知直, et al, 日本原子力学会 2004年(第42回) 春の大会要旨集 第 部冊 P.201