

画像サンプリングを応用したX線ストリーク  
カメラによる超高速X線画像計測法の開発

大阪大学 レーザー核融合研究センター 白神 宏之

レーザーを用いた慣性閉じ込め核融合実験は、大阪大学レーザー核融合研究センターのガラス・レーザー激光XII号や、米国ローレンス・リバモア国立研究所のNOVAレーザー、ロチェスター大学レーザー・エネルギー研究所のOMEGAレーザー、フランスのリメイユ研究所のPHEBUSレーザー等で行なわれている。これは、重水素等の核融合燃料を封入した直径数mmの燃料ペレットに周囲から多数のレーザービームを照射し、噴出するプラズマの反作用で燃料を内向きに圧縮し同時に加熱する方式で、このプロセスを爆縮(implosion)と呼ぶ。燃料プラズマの10keV程度までの加熱 [1]と固体密度の数100倍までの圧縮 [2]は既に達成されており、現在は核融合点火・燃焼と高利得ターゲット爆縮の実現に向けた研究が展開されている。

レーザー核融合実験の特徴は、計測対象としてのプラズマが (1)空間的スケールが10ミクロン～数ミリメートルと小さいこと、(2)時間的スケールが数十ピコ秒～数ナノ秒と非常に高速であること、さらに、(3)プラズマ密度が固体密度の1～1000倍程度の超高密度となることである。これらはいずれもプラズマ計測技術に対し、非常に高い空間分解能(数ミクロン程度)、時間分解能(数ピコ秒程度)を要求し、なおかつ高オバシティのため圧縮されたプラズマの中身が見えないという厳しい条件を与える。

このように高速で変化する微小ターゲットプラズマの爆縮ダイナミクスを調べるため、時間分解X線画像計測が重要な診断手段として用いられてきた<sup>1, 2)</sup>。ターゲット爆縮の初期段階ではプラズマの典型的な時間、空間スケールは数100ピコ秒及び数100ミクロンであるため、画像計測に要求

される分解能はそれぞれ50ピコ秒及び10ミクロンのオーダーとなる。X線ピンホールカメラまたはX線顕微鏡と結合したゲート型X線フレーミングカメラはこの要求に見合い、これまでの爆縮ダイナミクスや爆縮の一樣性に関する情報を与えてきた<sup>3, 4)</sup>。一方、爆縮の最終段階で形成されるコアプラズマのスケールは100ピコ秒及び数10ミクロンとなるため、計測への要求は分解能10ピコ秒及び1ミクロンとなり、これらは極めて実現が難しい。最近になって改良型のゲートX線フレーミングカメラで時間分解能35ピコ秒が達成されたが<sup>5)</sup>、コアプラズマ計測には依然能力不足であった。このような時間分解能に対する要求をクリアするため、筆者らは新たにX線ストリークカメラに画像サンプリングを応用することにより、マルチイメージングX線ストリークカメラ法という超高速2次元X線画像計測法を開発・実験に導入した<sup>6)</sup>。これにより現在では爆縮コアプラズマの2次元X線画像を時間分解能10ピコ秒、空間分解能15ミクロンで撮影することが可能になっている。

マルチイメージングX線ストリークカメラMIXS (Multi-Imaging X-ray Streak camera) を用いた時間分解2次元X線画像計測法<sup>6, 7)</sup>の原理を図1に示す。一定間隔 $s$ で直線的に配列した $N$ 個のピンホールを有するピンホールカメラ(像倍率 $=M$ )により、ストリークカメラの水平方向スリット上に $N$ 個の像を形成する。像の配列はカソードスリットに対して角度 $\theta$ だけ傾けてある。したがって光源上で垂直方向に距離 $(1/M)s(M+1)\sin\theta$ だけ離れた $N$ 個の異なる場所の像がサンプリングされ、分割1次元画像のセットとしてカソードスリットにより選択されたことになる(図1a)。分割1次元画像列はストリークカメラにより時間掃引され、

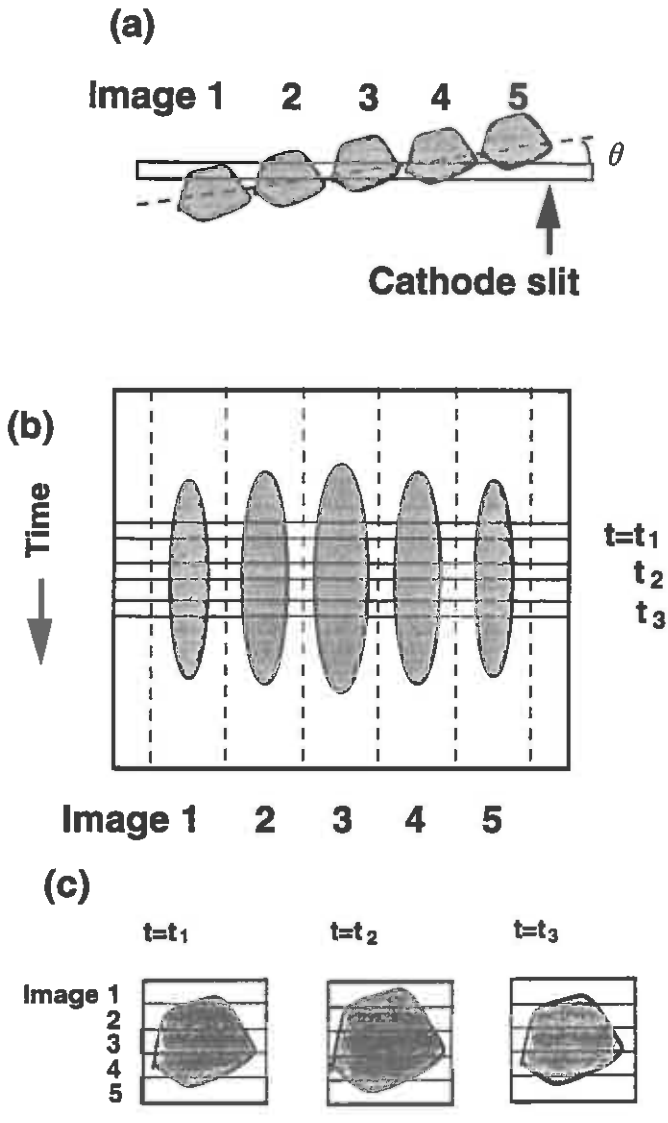


図1. MIXSによる時間分解2次元画像計測の原理

- (a) ホトカソード上の多重ピンホール結像
- (b) ストリークカメラによる時間掃引画像
- (c) 再構成された時間分解2次元画像  
( $t=t_1, \dots$  の各時刻)

記録される(図1b)。このストリーク像をある時刻(たとえば  $t=t_1$ )でスライスし、N個の分割1次元画像を“左→右”から“上→下”に並べ替えることにより元の2次元形状の画像が得られるわけである(図1c)。これは計算機メモリー上で容易に再配列できる。再構成された2次元画像は選択した時刻での瞬間像、即ちフレーミング像となっている。

MIXS法の利点は (1) X線ピンホールカメラ、X線ストリークカメラいずれも十分確立された計測器で技術的な困難が無く、単純な原理で2次元フレーミング像が得られる。(2) ストリークカメラを使用するため高速で連続的な時間分解像が得られる(今回時間分解能10ピコ秒が得られたが、さらに2ピコ秒までは市販のX線ストリークカメラにより可能である)。(3) 動作X線スペクトル領域はフィルターとカソードで決まり、1-10keVとかなり広い範囲で設定可能である、等。MIXS法を従来のゲート型X線フレーミングカメラ(XFC)と比較すれば、XFCが80または35ピコ秒の不連続画像であるのに対し、MIXSではより高速(10ピコ秒以下)で連続画像が得られる。一方、MIXSの視野は約150ミクロンでXFCの約1mmよりかなり狭いといえる。従って、XFCは爆縮初期のターゲット全体の観測に、MIXSはより高速で微小なX線光源である圧縮コアプラズマの観測にそれぞれ適していると結論できる。

大阪大学レーザー核融合研究センターのガラスレーザー激光XIIを用いたターゲット爆縮実験での

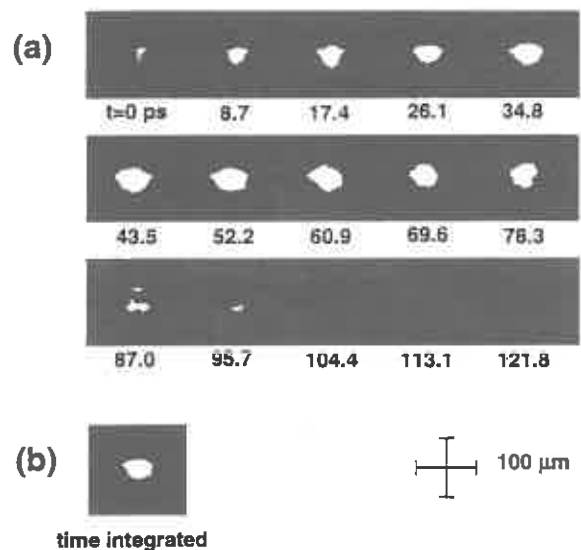


図2. 爆縮プラズマの再構成MIXS画像

- (a) 時間分解画像、1コマの露出時間は11.7ps、コマ間隔は8.7ps。時刻は相対値を示す
- (b) MIXSの時間積分画像

爆縮コアのX線画像データ例を図2に示す。

全レーザーエネルギーは 3.6キロジュール、レーザーパルス幅は 2.4ナノ秒、各ビーム間のエネルギーバランスは±3%以下である。各ビームには照射一様性改善のためランダム位相板を導入し、F数は 3.0である。ターゲットは重水素化プラスチック(CaD<sub>6</sub>)シェルで、直径は 589ミクロン、シェルの厚さは6.72ミクロン、シェル厚さの非一様性は±1.1%以下であった。

図2aは爆縮コアのX線発光像を観測し、再構成したMIXS像である。各フレームの露光時間は11.7ピコ秒、フレーム間隔は 8.7ピコ秒、空間分解能は約15ミクロン、観測X線スペクトルは $h\nu=2.5\sim 4.9\text{keV}$ である。初期の像から空間モード数 $l=2\sim 6$ の非一様性が現れ、 $t=50\sim 60$ ピコ秒付近でのX線強度のピークの後、さらにこれが顕著になっている。X線像における対称性とサイズは10ピコ秒程度の時間スケールで高速変化していることが解る。全体のX線発光はFWHMで80ピコ秒程度なので従来型のXFCでは1フレームしか得られないはずであり、これらの10ピコ秒分解の画像はMIXSにより初めて観測されたものである。図2bは積算されたMIXS像で、時間積分像に対応する。ここでは空間構造はスムーズに見え、時間分解像とは対象的である。

これらの結果から、レーザー核融合ターゲットの爆縮コアプラズマの研究においては時間分解画像計測が本質的に重要であることが解る。観測されたコアプラズマの非一様性はレーザー照射及び初期ターゲットの非一様性に関係していると考えられており、これらは現在最も重要な研究課題となっている。MIXSによるコアプラズマの観測結果は1次元及び2次元爆縮コードによるシュミレーション結果と比較して解析され、レーザー核融合の研究の進展に大きく寄与することが期待されている。

筆者らは現在さらにMIXSの手法をX線分光計測に応用した画像解析法<sup>9)</sup>や、画像サンプリングに

拡張する手法<sup>9)</sup>など、いくつかの新たな画像計測法も開発し、これらの実験への導入に成功している。

今後これらのピコ秒分解画像計測法は、超高速時間分解を必要とする様々な分野での応用が期待される。例えば、近年精力的に進められている超短パルスレーザー照射プラズマの研究においては生成されるプラズマの寿命はせいぜい数ピコ秒であるので、直接時間分解計測するには本手法が恐らく唯一の方法となろう。さらに、超高速で時間変化する現象の観測として、物性物理、原子物理、材料科学、X線分光科学、生物学等々の分野での応用を図って行きたい。

#### 参考文献

- 1) H. Azechi, et al., *Laser and Particle Beams* **9**, 193 (1991).
- 2) M. Katayama, H. Shiraga, M. Nakai, T. Kobayashi and Y. Kato, *Rev. Sci. Instrum.* **64**, 706 (1993).
- 3) M. Katayama, M. Nakai, T. Yamanaka, Y. Izawa and S. Nakai, *Rev. Sci. Instrum.* **62**, 124 (1991).
- 4) J. D. Kilkenny, *Laser and Particle Beams* **9**, 49 (1991).
- 5) D. K. Bradley, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 4813 (1992).
- 6) H. Shiraga, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 722 (1995); H. Shiraga, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 828 (1997).
- 7) C. Deeney and P. Choi, *Rev. Sci. Instrum.* **60**, 3558 (1989); P. Choi and R. Aliaga, *Rev. Sci. Instrum.* **61**, 2747 (1990); O. L. Landen, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 5075 (1992).
- 8) M. Heya, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 820 (1997); N. Miyanaga, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 817 (1997).
- 9) H. Shiraga, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 745 (1997).