

## ピコ秒レーザープラズマX線の生命科学応用

上坂充 細貝知直 \*木下健一 鐘ヶ江幸男 大久保猛  
(東大原施) \*(放医研)

X線は高い透過力を持つことから、今日に至るまで医療診断や非破壊検査など様々な分野で物体の内部透視に用いられてきた。またX線回折を利用した構造解析も盛んに行われている。さらに近年の加速器やレーザーの分野における極短量子パルス発生技術のめざましい進歩に伴って、極短パルスX線の開発が行われてきた。レーザープラズマX線は、大強度超短パルスレーザーを固体ターゲットに集光してプラズマを生成することにより得られる、ピコ秒領域の極短パルスX線である。これまでに、物質の高速過渡現象を観測するための手法であるポンプ&プローブ法と、物質の原子・分子レベルの基本的構造を解明することのできるX線回折を利用した、様々な現象の観測が報告されている[1]。東大原施では、ピコ秒時間分解X線回折システムを構築して、超短パルスレーザーによって半導体 GaAs 単結晶内に誘起されるピコ秒領域の過渡変化を示すX線回折像の取得に成功し、熱膨張や音響フォノンといった原子の動きの動画像化を行っている[2]。

そこで本施設では、このレーザープラズマX線を用いた時間分解X線システムを、生体・医療などの分野での需要が大きいX線イメージング、あるいはタンパク質の構造解析に応用するべく、改良を行っている。レーザープラズマX線をシンクロトロン放射光源と比べた場合、X線輝度、指向性、は太刀打ち出来ないが、短パルス性 (~10ps) による時間分解能には勝る。我々の現状値はレーザープラズマX線の発生光子数として、最大  $4 \times 10^9$  photons/shot(10Hz)を得ている。

### X線イメージング

位相コントラストを用いたイメージングでは、軽元素に対する位相コントラストは、現在一般的なX線撮影に用いられている吸収コントラストに比べて約 1000 倍大きく、従来は識別不可能であった正常細胞と癌細胞が鮮明に映し出される[3]。位相コントラスト像を

レーザープラズマX線によって取得しようと試みたが、X線強度不足や視野の狭さ、像のボヤケによって鮮明なものは得られていない。そこでレーザープラズマX線で取得可能な吸収コントラスト像撮影を試み、30秒(300ショット)の積算像を取得した(図1)。これらの像から、シングルショット撮影にはX線強度が10倍(金属サンプル)~100倍(生体サンプル)必要である事が分かった。今後、シングルショット撮影が可能となれば、X線イメージング分野では史上最短時間分解能である10psのレーザー固体アブレーション過程のイメージングを行う予定である。

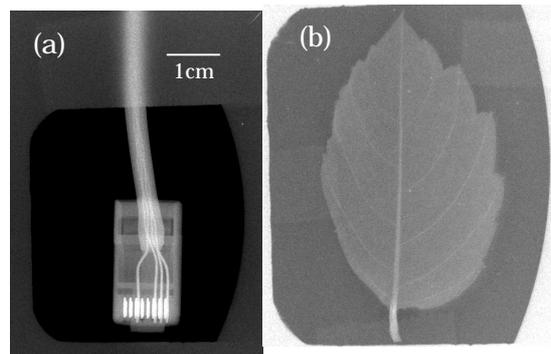


図1：吸収コントラスト像  
(a)LAN ケーブル  
(b)葉 (葉脈 ~ 200  $\mu$ m)

### タンパク質の構造解析

現在、生体試料を用いたX線回折による構造解析は、国内外で大型の放射光施設を中心として行われている。国内ではSPring-8に生体試料の構造解析専用の高輝度ビームラインが建設されている。時間分解能はミリ秒から、マイクロ秒である。バクテリオロドプシンのような光受容タンパク質では光を吸収するとタンパク質分子に結合している局所的な一部が構造変化し、それによ

り全体の構造が変化するものがある。  
 (図.2) このタンパク質中の局所的な構造変化はフェムト秒からピコ秒の時間領域で起きると言われている。レーザープラズマ X 線源はこの時間分解能を満たす可能性があり、また世界的にも X 線でこの時間領域の構造変化の観察は達成されていない。いくつかの実験、推算からレーザープラズマ X 線で各種回折像を取得するのにサンプル上に照射される必要な X 線光子数は下表のようになる。今後、発生 X 線増強に努め、ロドプシンに多く含まれるレチナールの X 線粉末回折像の取得を行う予定である。

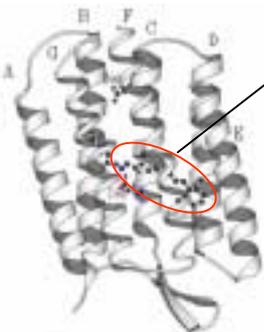


図.2 バクテリオロドプシン

- レチナール異性化 [ < ps ]
- フェムト秒レーザー分光 [ 4 ]
- レーザープラズマ X 線源 ~ ps
- 全体構造変化 ( > ps )
- シンクロトロン放射光 [ 5 ]

表.1 各 X 線回折像に必要な光子数と現状での必要積算時間

ブラッグ回折像	ラウエ斑点	デバイシエラー環
~10 <sup>6</sup> photons/image	~10 <sup>11</sup> photons/image	~10 <sup>11</sup> photons/image
~30秒	~800時間	~800時間

#### レーザープラズマ X 線増強

近年、レーザーのプリパルスの X 線発生に対する影響が示唆されてきている [6]。レーザーのプリパルスが固体ターゲット上に作るプリプラズマのプラズマ周波数  $\omega_p$  とレーザーの周波数が一致する時のプラズマ密度  $n_c$  (臨界密度) のところでレーザーメインパルスが共鳴吸収されて、高エネルギーの電子が生成される。この高エネルギーの電子がターゲット原子と衝突して特性 X 線、制動放射 X 線を発生させる。CuK 線はおよそ 8keV であるから、それ以上のエネルギーを持った電子がメインパルスによってより多く生成すれば、より大強度の X 線が発生すると考えられる。それには臨界密度地点でメインパルスの集光強度がより大きくなるように、プラズマ分布広がり方が小さくなったほうが良い。また、プラズマサイズが小さくなれば光源サイズが小さくなるので、X 線の空間分解能が向上する。また高エネルギー電子の輸送距離が短くなるので X 線のパルス幅も短くなると考えられる。

そこで X 線発生のために最適なパラメータを決定するためにシミュレーションを実行している。まず、レーザーのプリパルスが作るプリプラズマの状態を流体モデルの計算コード (HYADES コード) で計算する。そのプリプラズマとレーザーメインパルスの共鳴吸収を PIC (Particle-in-cell) コードで計算する。最後に得られた電子分布より、X 線発生部分をモンテカルロ法 (ITS-3.0) により計算する。

実験技術と結果の詳細は当日報告する。

#### 参考文献

- [1] C. Rose-Petruck, et al., Nature **398** 310 (1999).
- [2] K. Kinoshita, et al., Laser and Particle Beams **19** 125 (2001).
- [3] 百生敦, 武田徹, 板井悠二, 放射光第 14 巻第 2 号 107 (2001).
- [4] Toshihiko. Oka et al, PANS,2000
- [5] T. Kobayashi et al, NATURE,2001
- [6] A. Zhidkov et al, Physical Review E,2000