

X線自由電子レーザー実験での広帯域プローブ光学系の開発

発表者：0912140 山崎 晃誠

指導教員：米田 仁紀 教授

1 序論

X線自由電子レーザー (XFEL) は keVX 線領域でフェムト秒の超短波パルス性を有する高強度な光を放射できる。[1] この光源の出現により様々な新しい物理研究が行われることが期待されている。固体との相互作用では、高密度な内殻電子励起状態の研究がある。従来までと違い、固体内のほとんどの原子の内殻電子を励起されたような物質状態は初めて達成させるもので、その詳細な物理は解明されていない。これを調べるためにはその寿命にて広帯域の光学特性を評価することで、電子状態を決定できるが、広帯域かつ高い空間・時間分解能を持った観測システムが必要になってくる。そこで、本研究では、現在の X 線自由電子レーザー施設で行われている $1\mu\text{m}$ の集光実験 [2] で使用可能なプローブ計測の光学システムを構築することを目的とした。

2 観測に求められる条件

2.1 数 fs の時間分解能

内殻電子励起過程は、物質に電磁波を照射した際に光子エネルギーを吸収した内殻の電子が励起され、その空軌道に上位軌道の電子が遷移してくるまでの間を指す。このとき図 1 に示したように遷移にかかる時間は多く考えても数 fs の時間間隔で起きる。そのため、この現象を観測するためには、同程度の時間分解能が光学系に要求される。

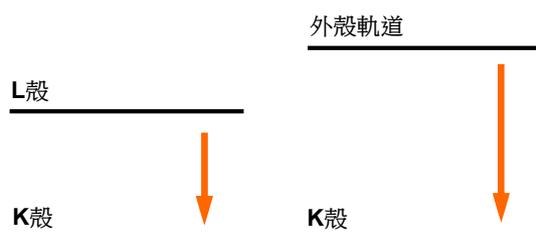


図 1: 遷移にかかる時間

2.2 $1\mu\text{m}$ の空間分解能

観測系に要求される条件として、 $1\mu\text{m}$ の空間分解能が求められる。内殻電子励起過程を観測する場合、より多くの内殻電子を励起することができれば観測が容易になる。すなわち、ポンプ光である XFEL 光の単位面積当たりの強度は大きければ大きいほど望ましいと考えられる。そのため、発生させた XFEL 光を集光し、それを利用することが必要とされる。X 線領域の光学素子形成の技術の進歩により、現在では図 2 のような装置を駆使して、約 $1\mu\text{m}$ 四方の領域に XFEL 光を集光することができる。この集光ビームを使用すると考えると、観測系に求められる空間分解能は $1\mu\text{m}$ 以下となる。これは、これ以上の空間分解能であると、集光領域外のデータも含まれてしまうからである。

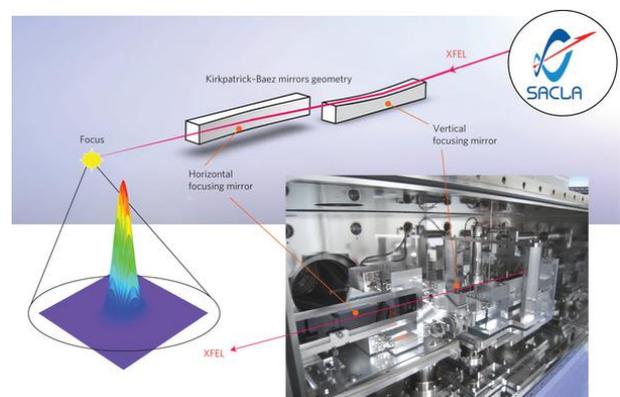


図 2: XFEL 用集光ミラー

3 プローブ光学系

金属を固体試料とした場合、その伝導帯の電子と内殻の電子では光学応答が異なる。前者は $\omega=0$ に極を持つ特性を持つが、後者は紫外から X 線に至るその共鳴エネルギーで極をもつスペクトル特性になる。そのため、光学周波数でも、可視域から真空紫外光に対応でき XFEL の集光径である $1\mu\text{m}$ 以下の空間分解能が必要になる。

一般に、透過型の対物レンズ系では、深紫外以下の波長で色消しレンズを構成できず、それ以上の波長でも $1\mu\text{m}$ 集光が可能な NA の大きなレンズではパルス幅が増加してしまう。このため本研究のシステムでは反射型のレンズを使用する。また、ターゲット上に存在する物質の内殻電子を同時に励起させる必要があるため、ポンプ光はターゲットに対して垂直に入射する必要がある。そのため、XFEL ポンプ用の光路として中心に空孔の空いているものを製作し使用することにした。一方、このような観測系では、複数のビームスポットや XFEL 透過用の薄い鏡の表面精度などのために、波面収差が生じることが多い。そのため、ここでは、デフォーダブル光学系を導入し、分解能を理論限界値まで高めるシステムとした。観測システムの概要は図 3 に示してある。

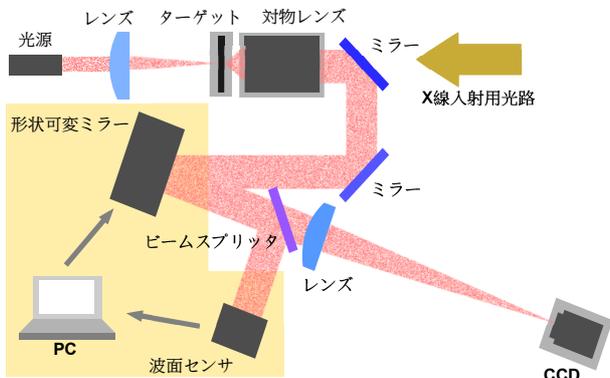


図 3: ポンプ・プローブ観測系

4 評価

4.1 評価方法

開発した光学系の性能評価のために紫外～可視の波長範囲でピンホールの点像分布関数 (PSF) を観測した。PSF による評価は、光学系の収差と回折を合わせた統合的な結像性能を表すことができる。

4.2 分解能の導出

CCD 上で得られたピンホールの PSF のデータから分解能の導出について示す。図 4 のように PSF の強度が 10% から 90% をとる距離間隔を Δx とし、それを倍率 M で割ることで PSF の分解能と定めた。

$$\delta = \Delta x / M \quad (1)$$

$$\tau = 1 / \Delta B \quad (2)$$

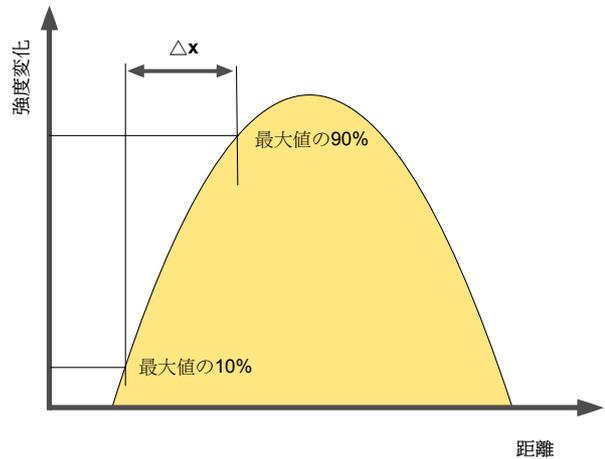


図 4: 分解能の導出

5 波長依存性の確認

製作した観測系の波長依存性を確認するためにプローブ光の位置に、テスト光として 410nm、532nm、632nm の光源を使用してピンホールの PSF 観測した。そのときの結果を図 5 に示す。

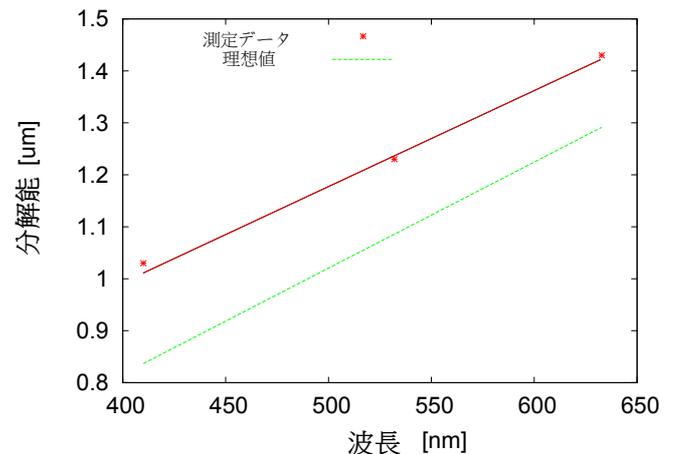


図 5: 分解能に対する波長依存性の確認

図 5 より製作した観測系ではテスト光として使用した波長帯域においては、 $1\mu\text{m}$ の空間分解能を達成できないことが判明した。テスト光をさらに短波長の物を使用すれば目標とする分解能に届くと考えられるが、そのような方法をとると時間分解能の面に問題が生じてしまう。本観測系では数 fs の時間分解能が要求されている。これを達成するために式 (2) で示されるようなパルス幅 τ は周波数帯域幅 ΔB の逆数で示されるパルス圧縮という方法を考えている。

この方法を使用することを考えると 350nm から 500nm の帯域が限界となる。したがって、500nm 付近で目標の空間分解能を下回ることが求められる。

結果より考えると、対物レンズに存在する空孔や XFEL を入射するために使用する薄膜ミラーの面精度による散乱が分解能を頭打ちにしている原因であると考えられる。これらの散乱要素に対応するために観測系に導入しておいた補償光学系を利用し、再び分解能に対する波長依存性の確認を行った。その結果を図 6 に示す。

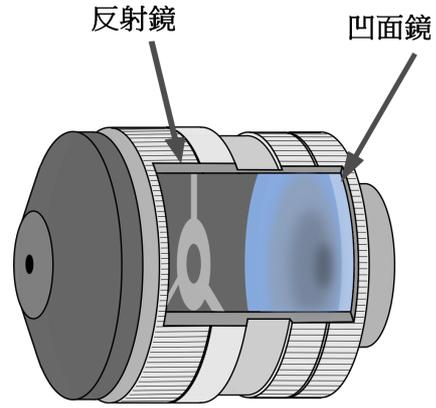


図 7: 対物レンズの内部構造

この影響を確認するため対物レンズとターゲットの間に針を挿入し、スポークの本数を意図的に増やした状態をつくり、その時に起こる像の変化を確認した。その結果を図 8、9 に示した。

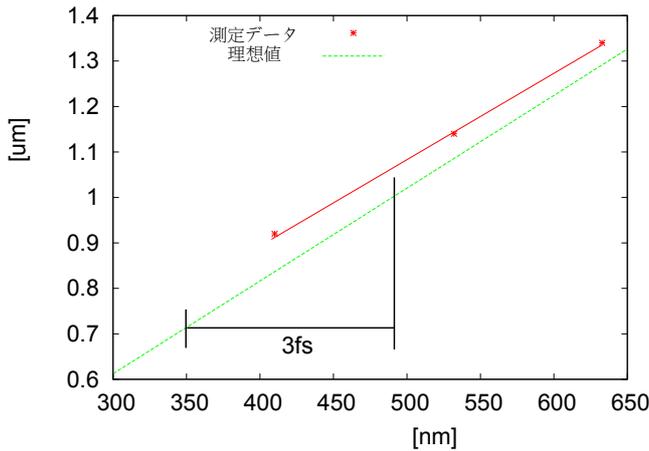


図 6: 分解能に対する波長依存性の確認

図 6 を見てみると、補償光学系を利用し波面補正を行った場合それぞれの波長での分解能の向上が認められる。この結果、 $1\mu\text{m}$ の空間分解能を達成した。また、時間分解能についても 350nm から 500nm の紫外領域のコンティニウム光をプローブ光として使用すれば約 3fs の時間分解能を確保できることが確認できた。

6 対物レンズによる像への影響

製作した観測系では図 7 に示すような反射型の対物レンズを使用している。レンズ内部には凸面鏡を支えるために 3 本のスポークが設置されている。このような内部構造は回折波を生んでしまう。その結果、得られる像の質が低下し正しい分解能が得られなくなる懸念が存在する。

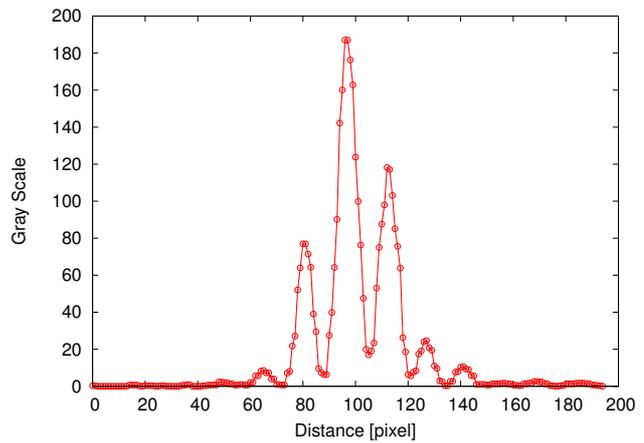


図 8: イメージの強度変化 (ナイフエッジなしの場合)

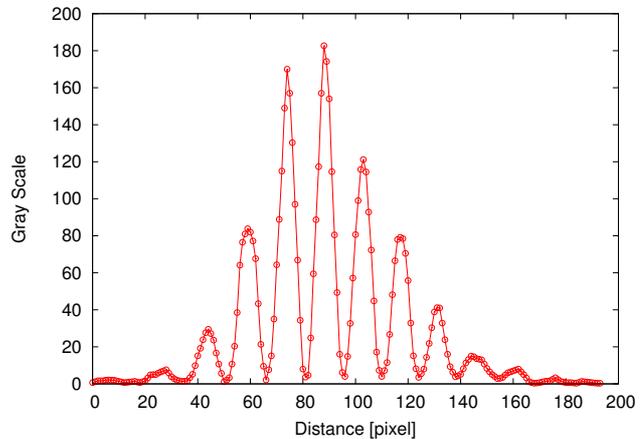


図 9: イメージの強度変化 (ナイフエッジ挿入時の場合)

図8、9よりスポークの本数の増加で像の質の低下が確認できた。これは、図7に示すようなスポークの存在する反射型対物レンズを使用することで、さけることのできない回折波が存在してしまうことを示している。

7 結論

XFELを利用した $1\mu\text{m}$ 以下の空間分解能をもつポンプ・プローブ観測系を作成、評価を行った。観測系にはレンズ中心に穴のあいた反射型対物レンズを用いて新しい形の観測系である。内殻電子励起過程を観測するための条件である1)数fsの時間分解能、2) $1\mu\text{m}$ の空間分解能に関しては350nmから500nmの紫外領域のコンティニューム光をプローブ光に利用することで達成できることが確認できた。また、レンズ中心の空孔や薄膜ミラーの影響は存在するが補償光学系による波面補償を行うことで補填できることを確認した。

しかし、波面補償後の分解能の波長依存性は、ほぼ同一でこれが補償光学系でとりきれない収差成分なのか、軸外しなどのアライメントのミスによるものか、調べる必要がある。

参考文献

[1]Hitoshi Tanaka and Makina Yabashi,"A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region"NATURE PHOTONICS 10,1038(2012)

[2]Hirokatsu Yumoto and Hidekazu Mimura,"Focusing of X-ray free-electron laser pulses with reflective optics,"NATURE PHOTONICS 10,1038(2012)