

# アンジュレーター光による FEL ビームラインのビーム診断

田中俊成<sup>1,A)</sup>、早川 建<sup>A)</sup>、早川恭史<sup>A)</sup>、佐藤 勇<sup>A)</sup>、横山和枝<sup>B)</sup>、菅野浩一<sup>B)</sup>、境 武志<sup>B)</sup>、石渡謙一郎<sup>B)</sup>、猪川弘康<sup>B)</sup>、中村吉宏<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 日本大学原子力研究所 電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

<sup>B)</sup> 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

## 概要

FEL 用電子ビームラインを、実験中に常時モニターする方法の一つとして、アンジュレーター中で発生する自発放射光を利用する方法を検討し、小型で安価な望遠鏡によるビームモニターシステムを製作した。FEL 共振器に誘電体多層膜ミラーを用いているので、ここでは発振に使われずミラーを素通りした高調波の光を利用する。FEL 発振への影響が全くなく、発振時の強い光による損傷の心配も少ないという利点がある。原理は簡単で、望遠鏡にアンジュレーターからの光を導入し、その光を CCD ビデオカメラに結像させることでアンジュレーター内での電子ビームの位置とビーム形状を知ることができる。望遠鏡は 3 台用い、それぞれアンジュレーターの上流、中央、下流に対応する位置に焦点を合わせ、モニター TV で見ながらビーム調整を行えるようにした。

## 1. はじめに

1999 年、日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) において可視～紫外領域での FEL 発振実験を行っている間に、アンジュレーターが強い放射線に曝され永久磁石の磁化が低下して使えなくなる、という問題が生じた<sup>[1]</sup>。アンジュレーター磁石各部について測定した残留放射能と磁場低下との相関から、アンジュレーターの前後と中央に置かれた蛍光板ビームプロフィールモニターで発生する放射線が主要な原因と推定された。

これを機会にアンジュレーター磁石列を変更し、電子ビーム透過が容易なビームダクト径を考慮し、磁極間隙が広く周期長が 2 倍の赤外用アンジュレーターを製作した<sup>[2],[3]</sup>。しかし、いずれにしても放射線による磁石の劣化を避けるために蛍光板によるビームモニターは使わず、それに代わる非破壊型のビームモニターを検討する必要があった。

その一つとして、ストリップライン方式のビーム位置検出器<sup>[4]</sup>をアンジュレーターの前後のビームライン上に設置するために製作し、ビーム誘起マイクロ波による位置検出特性の測定・試験を行っている<sup>[5]</sup>。

一方、S.Benson<sup>[6]</sup>によれば、アンジュレーターの自発放射光をビーム軸上から望遠鏡で直接観測することによってアンジュレーター中でのビームの振舞が詳細に観測できる。そこでアンジュレーターのビームラインの光学的延長上に望遠鏡を設置してビーム位置および形状をモニターするシステムを検討し、製作した。以下においてこのシステムについて詳細に述べる。

## 2. 高調波光の利用

アンジュレーター中のビームライン上任意の点で放射される自発放射光の横方向分布は、基本波か高調波かによらずその放射源である電子ビームの横方向分布を直接反映する。従って、アンジュレーター中の任意の点に合焦させた光学系で結像される像は、その点での自発放射光の分布を示すとともに電子ビーム形状も表す。この像を得るために利用する光としては、光学系の組み立てと画像化の容易さから可視光が最も適している。

LEBRA 赤外用アンジュレーターで目標としている FEL 発振波長範囲は 1~5 $\mu\text{m}$  である。当面 1.5 $\mu\text{m}$  での発振実験のために共振器には中心反射率 99.5% の誘電体多層膜ミラーを使っている。

誘電体多層膜ミラーを使うと大出力 FEL による破損の心配があるが、FEL 発振に影響を与えることなく常時高調波をモニターすることができる。特に奇数次の高調波はビームラインの軸上に強く放射されるので、アンジュレーターから離れた点で観測するのに都合が良い。

現在使用している 1.5 $\mu\text{m}$  用のミラーは高反射率の波長範囲が 200nm 程度と狭く、可視以上の短波長光は共振器内に蓄積されずほとんどミラーを素通りする。従って可視光である波長 500nm の第 3 高調波がミラーの裏側から容易に観測できる。

このことからアンジュレーターからの第 3 次高調波光を利用し、小型の望遠鏡を使って結像するシステムを検討した。

## 3. 予備実験

実際にシステムを構築する前に予備的な自発放射光観測実験を行い、第 3 次高調波の自発放射光分布

<sup>1</sup> E-mail: tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp

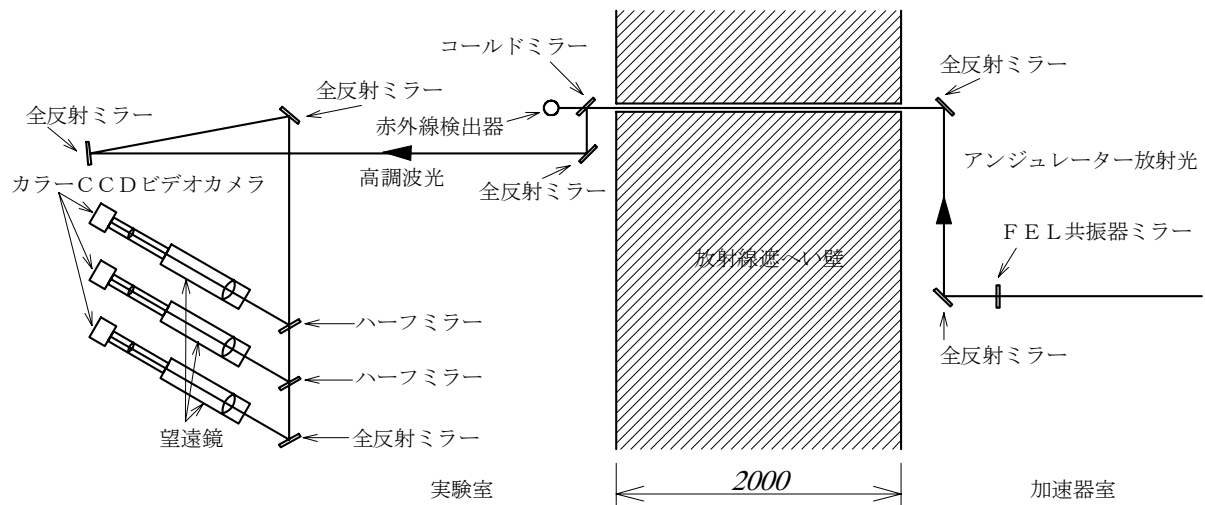


図1：自発放射光観測光学系の配置。アンジュレーターからの自発放射光のうち第3次高調波光を観測することにより、電子ビームの位置・形状をモニターする。望遠鏡は3台設置し、それぞれアンジュレーターの上流、中央、下流の各部で生じた自発放射光を観測する。

を示すスポット像を CCD ビデオカメラで観測した。磁石部分の全長2.4mのアンジュレーター中心から軸上で約10m離れた点に焦点距離500mm、口径76mmの屈折望遠鏡を置き、アンジュレーターからの光を集光して焦点距離20mmの接眼レンズで像を拡大投影して CCD カメラに結像させた。

この結果、望遠鏡の焦点を調節するとアンジュレーターの最上流から最下流までの間で放射された自発放射光のスポットとそのビームライン上の位置による違いが容易に観測できることが確かめられた。

これは、アンジュレーター中での電子ビーム直径が1mm程度であるのに対して、自発放射光はローレンツ因子 $\gamma$ の電子では $1/\gamma$ rad程度の広がりを持つため望遠鏡の焦点が外れると放射光の像が大きくボケて、結局ビームライン上の短い範囲の光だけが良好なコントラストで結像して見えることによる。

#### 4. 自発放射光観測光学系の構成

このように、アンジュレーター内の位置による自発放射光のスポットの違いが確認できたので、十分電子ビームをモニターすることが可能と考え、予備実験に用いた光学系を元に、図1に示すような配置で自発放射光観測光学系を製作した。光学系の構成は以下のようになっている。

望遠鏡は3台用い、アンジュレーター光をハーフミラーで分割して導入し、それぞれアンジュレーターの最上流、中央、最下流でのビームスポットを常時観測するように焦点を合わせることにした。光学系はアンジュレーターが設置された加速器室の隣にある実験室で光学台の上に組み立てた。

この光学系にはアマチュア用として一般に販売されている天体望遠鏡とそのパーツを多用した。望遠鏡にはトミー製のBORG76ED (fl=500mm、F6.7)を用い、筒先に光量調節用 $\phi$ 52mm ND フィルターを取り付けられるレンズキャップを被せてある。CCD カ

メラはミントロン社製の MK-7482NB 1/4"カラーカメラを用いている。

カメラの画角の中でビームスポットの位置を確認できるように、天体の高精度手動ガイドに用いるビクセン製ガイドアイピース GA-4 をカメラの前に挿入しカメラの画面上に光量可変のスケールパターンを表示させるようにしている。また、望遠鏡の直焦点位置に CCD 面を置くと像が小さすぎるため、惑星などの拡大写真撮影に用いる拡大投影用アダプターと拡大用にビクセン製 20mm 接眼レンズを挿入し像を約2倍に拡大している。

#### 5. 光学系のアライメント

図2に望遠鏡周辺の配置を撮影した写真を示す。望遠鏡のアライメントは FEL 共振器ミラーのアライメントに使われている He-Ne レーザービームをそのまま用いて行った。アライメントの手順は以下の通りである。

まず、望遠鏡対物レンズの中心にレーザーのスポットがほぼ一致し、かつ対物レンズを通過して細くなったレーザービームが接眼部のほぼ中心を通過するよう、途中のミラーと望遠鏡の向きを調整する。これで粗調整が完了する。

次に、ガイドアイピースを取り付け、レーザービームが拡大用接眼レンズの中心を通過するよう望遠鏡直前のハーフミラーを調整する。

最後に CCD カメラを取り付ける。FEL 共振器の最上流にあるレーザー光入射窓にトレーシングペーパーを置いてレーザー光を拡散させ、そのスポットを望遠鏡を通して CCD カメラに結像させ、像が CCD の画面に表示されるスケールパターンの中心に一致するよう望遠鏡の直前にあるハーフミラーを調整する。

このようにして、望遠鏡の光軸をアンジュレーター中の共振器ミラーの光軸に一致させられるので、

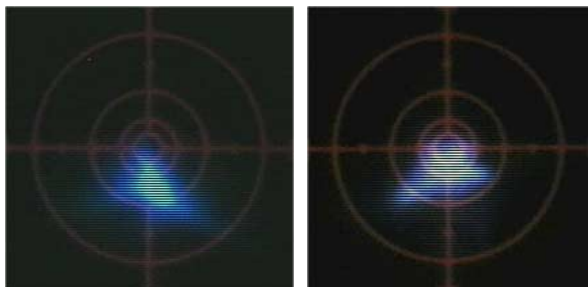


図 2 : 光学台の上に組み立てられた望遠鏡周辺の構成とミラーの配置

電子ビームが放射する自発放射光のスポットをスケールパターンの中心に一致するよう電子ビームを調整すると、電子ビーム軌道を FEL 共振器の光軸に一致させることができる。また自発放射光のスポット形状は、ほぼ電子ビームの断面形状を表すと考えられる。

## 6. 結果とまとめ

この光学系を用いて FEL 発振実験の際に観測した第 3 次高調波の自発放射光を図 3 に示す。左側がアンジュレーターの上流部分、右側が下流部分で発生した第 3 高調波 (波長 500nm) の光のスポットで、CCD ビデオ画像を PC に取り込んでトリミングしてある。薄く赤いスケールパターンの最小円の直径は、電子ビームのサイズに換算しておおよそ上流側で



上流部スポット      下流部スポット  
図 3 : 観測された高調波光のスポット

0.9mm、下流側で 0.7mm と見積もられている。上流側下流側ともビームの位置が He-Ne レーザーの軸から若干ずれ、形状も非対称でそれぞれ異なることが分かる。しかしこの状態でもミラーの調整により波長 1.5 $\mu$ m の FEL が発振した。

電子ビームを調整すると、上流と下流では明らかに調整を反映して独立にスポットの形状や位置が変化する。ビームサイズと位置の調整がこのスポットを参照しながら行えることから、アンジュレーター中の電子ビームモニターとしてこの方法が有効であることが確認できた。

## 参考文献

- [1] I.Sato, et al., "Advanced Status at LEBRA in Nihon University", Proceedings of the 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July. 12-14, 2000, p24
- [2] K.Hayakawa, et al., "Construction of the Infrared Undulator at LEBRA", Proceedings of the 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July. 12-14, 2000, p56
- [3] Y.Hayakawa, et al., "Observation of IR Spontaneous Radiation at LEBRA", Proceedings of the 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July. 12-14, 2000, p358
- [4] I.Sato, et al., "Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB", KEK Report 95-18 (1996) p286
- [5] 石渡謙一郎 他, "非破壊型ビームポジションモニターの開発研究", Proceedings of the 26<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001
- [6] S.Benson, Private Communication