

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12654

研究課題名（和文）X線ピンホールカメラによる高輝度放射光X線ビームプロファイルの可視化

研究課題名（英文）Visualization of high-intensity synchrotron radiation X-ray beam profile with X-ray pinhole camera

研究代表者

工藤 統吾（Kudo, Togo）

公益財団法人高輝度光科学研究センター・ビームライン技術推進室・主幹研究員

研究者番号：40372148

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：我々は、現代科学の基盤の一つであるシンクロトロン放射光の歴史の中で未解決の問題とされてきた、光源から発生する光ビームの位置を直接、しかも非破壊に計測する方法を開発した。これは、X線ビームがダイヤモンド薄膜透過時に発生する散乱を、ピンホール光学系と画像処理によりエネルギー分解可視化するという方法である。可視化された光は、アンジュレータ設計の基礎となる計算コードSPECTAでの結果と一致し、我々のシステムが正確にアンジュレータ光を可視化していることを証明した。この成果は将来の回折限界リングシンクロトロン放射光において基幹となるビーム計測システムを担うものとなる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シンクロトロン放射光は、タンパクの結晶解析などで不可欠な科学インフラとなって久しいにもかかわらず、光源から光がどの方向に向かっているかを正確に知る方法が無かった。ますます微小化していくサンプルを解析するには、正確なビーム位置制御が基礎となる。そのため正確なビーム位置計測手法確立は急務であった。我々は、歴史的難題を、世界初の方法により解決し、真の放射光X線ビームの中心を観察することに成功した。計画が進む回折限界リングから発する放射光は、更に小さなビームサイズを実現して様々な科学分野を底上げするものである。本研究の成果により、回折限界リングの性能を100%引き出せる状況が整った。

研究成果の概要（英文）：We have developed a method to directly and non-destructively measure the position of the synchrotron radiation x-ray beam, which has been an unsolved problem in the history of synchrotron radiation. This is a method of energy-resolving visualization of scattering generated when an X-ray beam is transmitted through a diamond thin film by a pinhole optical system and image processing. The visualized light is consistent with the results in the computational code SPECTA, which is the basis of the undulator design, demonstrating that our system accurately visualizes the undulator light. This method will play a key role in the beam measurement system that will be the basis for future diffraction-limited ring synchrotron radiation.

研究分野：量子ビームイメージング

キーワード：量子ビーム 放射光 ビームモニター X線検出器 X線散乱 2次元検出器 画像解析 回折限界リング

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大型放射光施設 SPring-8 などの高輝度放射光施設は、分子生物学をはじめ、物質科学、材料科学、分析化学などの広い分野の研究に大きく貢献している。タンパク質構造解析はもはや放射光無しではありえない。更に今日、放射光光源の高輝度化とコヒーレンスの向上により、高分子のゆらぎ解析や、1分子の動きの解析など従来に無かった分野が生まれ、静的な構造解析から、動的ダイナミックスの時代へと移行しつつある。

光源の高輝度高コヒーレンス化はビームサイズを極限まで微小化し、試料への正確なビーム導入がますます難しくなる。キーポイントは放射光軸の正確な計測である。驚くべきことに、高輝度放射光リングにおいて、光学系上流の光源から出射された“生”の光軸を直接計測する方法はかつて今も存在していない。

理由は、2点ある。

光学系上流の放射光軸は、パワーが高すぎて熱負荷に耐える検出素子が存在しない。

光軸を検出素子に当ててしまうと、下流で光ビームが使えない。

この問題を回避すべく、光軸中心を避けて周辺部を観測し、光軸を間接的に算出する方式が世界中の放射光施設で採用されてきた。この方式には以下2つの致命的な欠点がある。

結晶分光器上流の放射光は理想的なガウスビームではなく、エネルギーごとに複雑な形状を有している。すなわち分光しないとビーム中心はわからない。

リング型加速器では挿入光源の上下流の偏向電磁石からの放射が混入する。

本研究は、問題提起されて久しい放射光ビームモニタリング上の最大のこの問題についての、光子検出技術を用いた新しい視点からのアプローチである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高い熱負荷に曝される放射光施設の挿入光源用ビームラインにおいて、今まで不可能であった大強度放射光ビームの光軸位置をはじめ“直接見る”ことである。

これまで世界のどの放射光施設においても、大強度放射光の光軸の計測を直接行うことが出来なかった。これまで提案され実現されてきた方法はすべて、間接的な計測から光軸を“推定”するものであった。そこで、我々独自の技術である耐熱ダイヤモンド薄膜を有する検出素子の開発研究を進展させることで、挿入光源用ビームラインにおいても、放射光ビームの中心部の動態を直接計測することが可能となると考えた。

問題となるのは、ダイヤモンドをどのように利用して情報を得るかである。ダイヤモンドの半導体特性を利用し、電気信号として取り出すタイプは従来から提案され、世界的にも実用化が進んでいる。しかしながら、多くの場合電極の数が4個程度と小数であり、放射光のプロファイルが変わると光軸情報はシフトする。また、電極を微細にしてピクセル検出器として構成するものは、信号処理回路系が複雑化し、広ダイナミックレンジの実現が難しい。我々はダイヤモンドを半導体として利用するのではなく、単純な散乱体として利用する。

ホウ素Bを高濃度ドーピングしたダイヤモンドはX線領域での励起により可視光の蛍光を発するので、そのままでもスクリーンモニターとしてビームの観測に使用することができる。しかしその発光波長は一定で、これを発光分光イメージングしても、入射ビームについて得られる情報は非常に少ない。一方、散乱X線には、入射ビームエネルギーの空間分布の情報が含まれている。この散乱をピンホールカメラで結像したものは、入射ビームのエネルギー分布、空間分布を反映したビームそのものの“レプリカ”である。ゆえに、このレプリカを解析してやることにより、我々は光軸を“直接見る”と等価な情報を得ることができる。この方式は、従来提案されたことがなく、申請者が初めて考案した独自なものである。

3. 研究の方法

X線ビームを透過させるためのダイヤモンド薄膜として、厚さ0.5mmのシリコン(100)基板上に成長させたCVDダイヤモンド多結晶膜(住友電気株式会社)を用いた。ダイヤモンド薄膜は、45 μm の厚さで基板の片面に堆積した。中央領域は、Si基板をエッチングし、直径10mmのビーム通過領域を形成した。ダイヤモンドの成長面を機械的に研磨して、30nm未満の表面粗さ(Rp)とした。これを図1に示すように、水冷式の銅製ホルダーに取り付けた。

図2に、実験装置の概略図を示す。X線ビームは45°でダイヤモンド薄膜(図2[B])に入射する。散乱X線は250 μm 厚のBe窓から空気中に取り出され、ピンホールを抜ける、液体窒素(LN)冷却直接検出型電荷結合装置(CCD)カメラ(PI-LCX LN、プリンストンインスツルメンツ)で撮像する。水平方向の直線偏光している放射光からの散乱に対して検出効率を高めるために、CCDカメラはダイヤモンド薄膜上のビーム照射点を60°(1)から見るように配置した。

2については、図2(A)に示すように30°とした。CCDカメラによってキャプチャされた画像データは、画像取得ボード(1700-0491 PCI Bus Interface、Roper Scientific)で取得した。ピンホールカメラシステムの倍率1:1を実現するようにこれらコンポーネントを配置した。

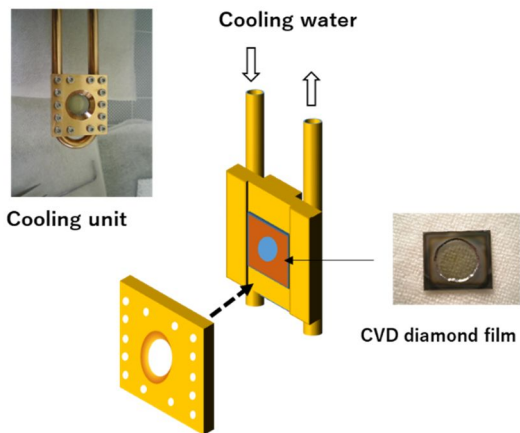


図1 高さ18mm、幅20mmのSi基板(右)上に成長させたCVDダイヤモンド薄膜。直径10mmの円形エッチング領域に、ダイヤモンド膜のみを残す。

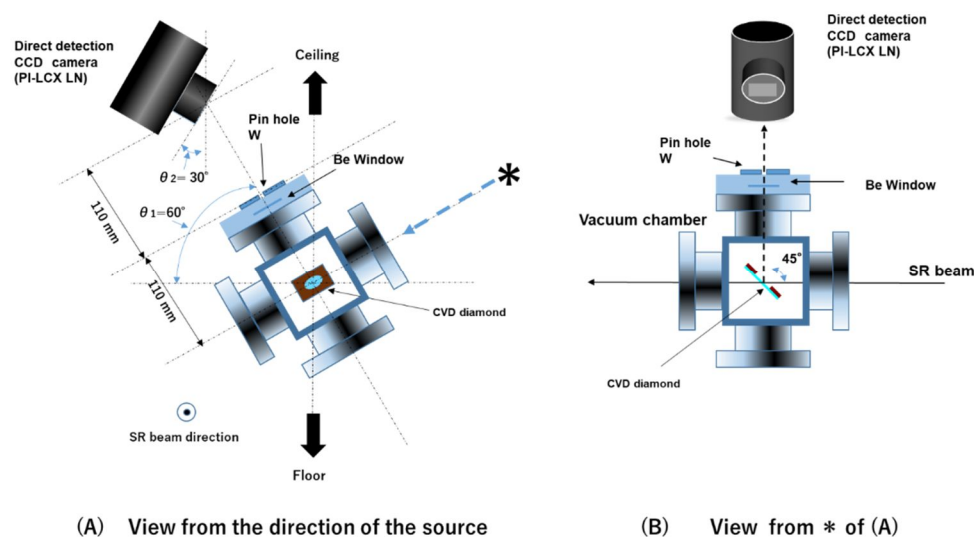


図2: 実験装置の概略図:(A) 下流から見た様子。ビーム方向は紙面後ろから前。(B)(A)の*マークの方向から見た様子。ビーム方向は右から左。

本セットアップを SPring-8 BL13XU 光学ハッチの分光器上流に設置した。実ビーム試験は蓄積電流 10mA の運転調整時間にて行った。ギャップは 38mm 固定とした。BL13XU での 38mmGAP は、18.63 keV である。

4. 研究成果

図3は、CVDダイヤモンド薄膜から散乱されたX線のピンホールカメラ画像である。観測点方向により、ビームスポットは60°傾斜している。明るい長方形のスポットは、FEスリットにより形成されたビーム形状である。

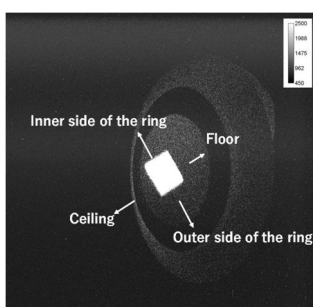


図3 : 散乱X線のピンホールカメラ画像。
1光子>/画素/frameを実現する短い露光時間(0.1秒)で400フレームをキャプチャし、各画

像に対して光子エネルギー解析をほどこした。その結果、ビームの画像からエネルギースペクトルを得た（図4）。12～19 keVのエネルギーバンドが、CVDダイヤモンド膜から散乱されたアンジュレータ放射である。このスペクトルには、ダイヤモンドをクランプする銅ホルダーの蛍光他、ダイヤモンド膜の結晶粒子からの回折を表す多数のピークが含まれる。

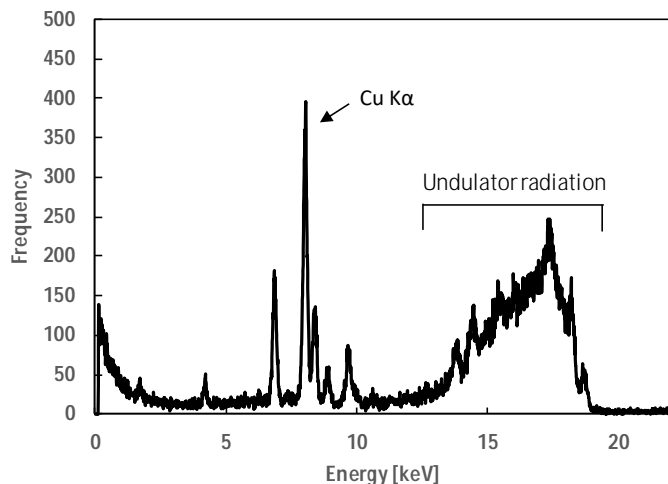
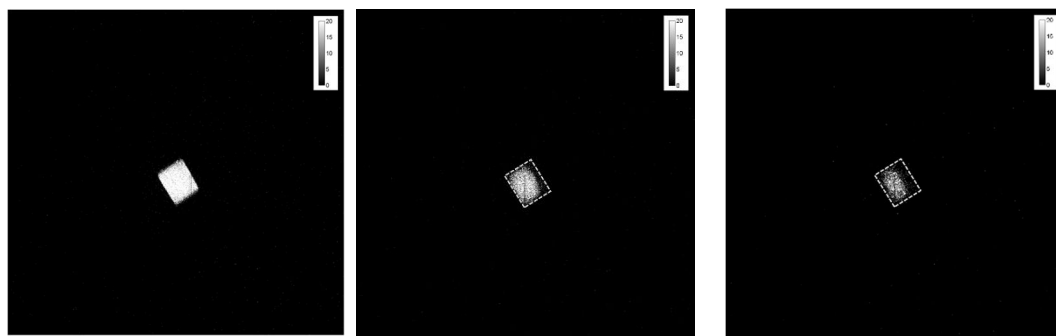


図4：画像データから計算されたエネルギースペクトル。

図4の解析を、400枚の画像対して行い、特定のエネルギーバンドを持つ光子画像を作成した。図5に、それぞれ(A) 12-19.5 keV、(B) 16.5-19.5 keV、および(C) 17.5-19.5 keVのエネルギーバンドのビーム画像を示す。(A)は、図4に示したアンジュレータスペクトルの全エネルギー範囲のビームスポットであり、FEスリットの形状を反映した図3と同様である。(B)は、アンジュレータスペクトルの低エネルギーを除去したものである。(B)のビームスポットサイズは(A)よりも小さくなった。(C)の画像には、高エネルギー成分のみ含まれる。(C)のスポットサイズは(B)よりもさらに小さくなった。

このように、2次元検出器のエネルギー分解能を用いることで、アンジュレータ放射の任意のエネルギー帯を切りだして可視化できるシステムの実証に成功した。



(A) 12-19.5 keV

(B) 16.5-19.5 keV

(C) 17.5-19.5 keV

図5 各種エネルギーバンドで切り出したビームスポットのX線ピンホールカメラ画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Aoyagi Hideki, Furukawa Yukito, Takahashi Sunao, Watanabe Atsuo	4. 巻 24
2. 論文標題 Pulse-mode x-ray beam position monitor prototype for a synchrotron radiation beam line	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Accelerators and Beams	6. 最初と最後の頁 032803-1,13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.032803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sano Mutsumi, Takahashi Sunao, Shiro Ayumi, Shobu Takahisa, Nakada Kengo	4. 巻 1016
2. 論文標題 Internal Dislocation Density in Deformed GlidCop from X-Ray Line Profile Analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 1223 ~ 1228
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.1223	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Togo Kudo, Mutsumi Sano, Toshiro Itoga, Hiroo Tajiri, Kyosuke Ozaki, and Sunao Takahashi	4. 巻 91
2. 論文標題 Energy-resolved beam-monitoring system for undulator radiation using scattering from a chemical-vapor-deposition diamond film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 033103-1,5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5141152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Abe Masaki, Kaneko Fusae, Ishiguro Nozomu, Kudo Togo, Matsumoto Takahiro, Hatsui Takaki, Tamenori Yusuke, Kishimoto Hiroyuki, Takahashi Yukio	4. 巻 28
2. 論文標題 Development and application of a tender X-ray ptychographic coherent diffraction imaging system on BL27SU at SPring-8	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Synchrotron Radiation	6. 最初と最後の頁 1610 ~ 1615
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1107/S1600577521006263	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 工藤 統吾
2. 発表標題 エネルギー分解型放射光X線ビームモニタ
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 工藤統吾、尾崎恭介、小橋佑輔、松本崇博、初井宇記
2. 発表標題 高精度直接検出型 2 次元 X 線検出器 SOPHIAS-L テンダー への展開
3. 学会等名 日本放射光学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 工藤統吾、尾崎恭介、小橋佑輔、松本崇博、初井宇記
2. 発表標題 高精度直接検出型2次元X線検出器 SOPHIAS-L TENDERへの展開
3. 学会等名 量子イメージング研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高橋 直 (Takahashi Sunao) (60426525)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・ビームライン技術推進室・兼務職員 (84502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------