

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286092

研究課題名(和文) X線波束の異常シフト現象を利用した光学素子開発とベリー位相項の可視化研究

研究課題名(英文) Optics development using the anomalous translation effect of x-ray wave packet and visualization of Berry's phase

研究代表者

香村 芳樹 (Kohmura, Yoshiki)

国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・ユニットリーダー

研究者番号：30270599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年、ブラッグ反射条件近傍に置いたひずんだ結晶によるX線波束の異常シフト現象が理論で予言され、我々が世界で初めて実証した。本課題では、この現象を新しいX線光学開拓に利用する事を目的とし、出射光が入射光と平行な極低発散光だと実証した。結晶の格子ひずみに高周波の時間変調を与え、これを数桁増幅した形で生じるX線の異常シフト量が、高周波で追従するか調べた。実験で、異常シフトX線は800kHzの時間変調に追従し、出射位置を秒速80mで走査する事ができた。この走査速度と、100ミクロン程度のストロークの実現により、光自体の走査によって、試料を走査する従来の走査法を超える高速化が可能であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：We experimentally verified the theoretical prediction of an anomalous x-ray translation of x-ray wave packet inside deformed crystal. In this research project, we applied the phenomenon to expand the research of x-ray optics. First, we proved that the exit beam is parallel to the incident beam with the similar angular low divergence. Second, we provided a high frequency temporal modulation on the crystal lattice deformation to see if the anomalous x-ray translation can follow the modulation. Experimentally the anomalous translation followed a fast modulation of 800 kHz. Furthermore, the exit beam from the crystal was scanned with the speed of 80 meter/s, due to the shrinkage and expansion of amount of translation. The fast scan speed of the output beam, 80 m/s, and the large stroke, 100 micrometers, indicate a new method of ultra-fast scanning of the x-ray beam which is difficult to achieve by scanning the specimens in the traditional way.

研究分野：X線

キーワード：全反射を伴わないX線導波管 結晶格子ひずみ 曲率発散角のビーム形成 ベリー位相項の観察

### 1. 研究開始当初の背景

平成20年度-24年度にかけての科研費基盤研究Bにおける課題「ブラッグ反射条件近傍に置いた結晶によるX線波束の異常シフトの観察とX線導波管応用」で、我々は、ひずんだ完全結晶中を伝搬するX線の異常シフト現象を予言した理論を、世界で最初の実証した。ブラッグ角近傍にセットされた結晶中をX線が5mm程度、ブラッグ反射方向でも、透過方向でもなく、結晶面に沿った方向に伝搬するという新現象を見出した。そして、異常シフト現象では、異常シフト量は、格子ひずみ量よりも5から6桁大きな量となるという理論と合致する結果を得た。

ベクトルポテンシャルに対し、実空間座標を使ったrotation(回転)を計算すると、磁場の有無が分かるが、今回の理論によれば、ひずんだ結晶中で、X線が感じるベクトルポテンシャルに、逆区間と実空間にまたいだ渦の性質が生じ、X線軌道を大きく偏曲させることがわかる。電子線では、同様の渦の性質が生じ、ホール効果や、異常ホール効果などを引き起こしており、基礎、応用研究が開いている。

### 2. 研究の目的

今回の科研費基盤研究Bにおける課題「X線波束の異常シフト現象を利用した光学素子開発とベリー位相項の可視化研究」では、X線の異常シフト現象を新しいX線光学開拓に利用する事を目的とした。

本課題では、第一の実験として、出射光が入射光と平行な極低発散光だと実証した。

第二の実験として、結晶内部の格子ひずみ(原子の格子面からの変位)に高周波の時間変調を与え、X線の異常シフト量を、高周波で変調させた。この方法で、X線の異常シフト量も、高周波で変調させられるかどうか、調べた。この実験では、異常シフト量が、格子ひずみ量を5桁以上拡大することを利用した。

第三の実験として、異常シフトX線の結晶内伝搬経路を精密に測り、三次元ひずみ分布の情報取得を試みた。このため、異常シフトX線の結晶内伝搬経路を簡便に測定する方法を考案した。

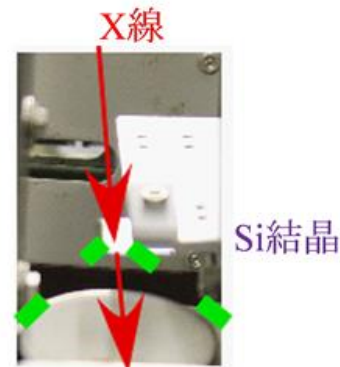
### 3. 研究の方法

第一の実験として、出射光が入射光と平行な極低発散光だと実証するため、ひずみ結晶下流に、結晶による出射角度分布のアナライザーを入れ、角度分布を計測した。

第二の実験として、高周波の振動を結晶に与えるため、800kHz、の超音波振動子からの超音波を50ミクロン厚のシリコン結晶(400)面に照射した(図1参照)。

通常、異常シフト量は大きく、結晶面に沿って伝搬したX線の多くは結晶縁に到達し、結晶縁にX線が集積される。まず、薄膜結晶下流に、縁から出射されるX線を取り出す位

置にスリットを設置し、スリットを通るX線強度変化を測定した。そして、異常シフトX線強度に、800kHzの変調が載るかどうかを調べた(図2参照)。



800kHz集束超音波

図1. 集束型超音波振動子から、シリコン結晶面への800kHzの超音波照射の様子。下方に見える凹面の振動子から超音波が放射され、集束され、シリコン結晶面に照射される。

#### スリット位置固定、TOF計測

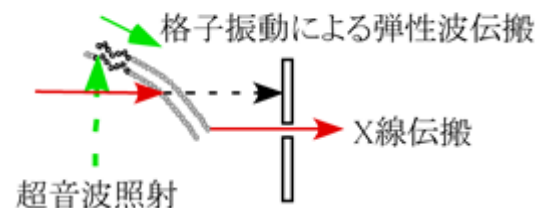


図2. 結晶縁に位置を固定したスリットを設置した。

続いて、スリット位置を、結晶縁以外の位置に動かしながら、位置に応じて出射光の到達時間が変化するかどうかを調べた(図3参照)。これらの測定では、X線の検出に、高速X線検出器を用いた。さらに、振動励起信号をトリガー開始時間とし、TOF(Time of Flight)時間を変えながらX線強度を計測し、TOFスペクトルを取得した。

#### スリット位置を変え、TOF計測

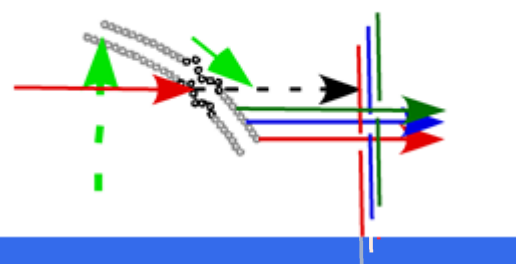


図3. スリット位置を結晶縁付近で移動させながら、計測を行った。

第三の実験では、人工ダイヤモンド結晶を用い、結晶中の不純物によって、結晶中に格

子ひずみや、X線異常シフト現象が生じる結果、X線が特定の経路をたどる様子を観察した。人工ダイヤモンド中をX線が伝搬する際の可視発光を顕微鏡で観察した。顕微鏡は、ダイヤモンド結晶側面に設置し、高倍率の可視光顕微鏡で、X線経路の情報を得た。

#### 4. 研究成果

第一の実験では、ひずみ結晶下流に、結晶による出射角度分布のアナライザーを入れ、角度分布を計測した。測定の結果、出射光が入射光とほぼ同じ程度の極低発散角を有すること、また、入射光と出射角が5マイクロ秒角程度のずれを除くと平行であることが示された。この角度ずれは、結晶への入射や出射の際の屈折の影響で説明される。

第二の実験では、薄膜結晶下流にスリットを設置した。スリット位置固定で強度変化を測定し、800kHzで異常シフトX線強度に変調が見られることを確認した(図4参照)。

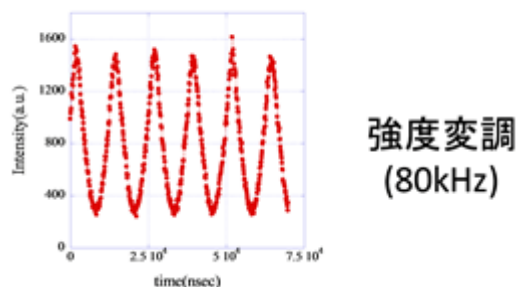


図4. 結晶縁に固定されたスリットを透過したX線強度に、800kHzでの変調が観察された。

続いて、結晶縁以外の位置から出射されるX線強度を計測するため、スリット位置を変えながら、位置に応じて出射光の到達時間が変化する様子を、TOF計測で調べた。振動励起信号をトリガー開始時間とし、スリット位置を変えながらX線強度を計測し、TOFスペクトルを取得した。この結果、スリット位置によって、出射光の到達時間が変化する様子が観察された。50マイクロ秒移動させたスリットを通るX線の到達時間には0.6マイクロ秒の時間差があったため、異常シフトX線が結晶内を秒速80mで移動したことが分かった(図5参照)。ブラッグ条件からのずれの大小は、異常シフト量の大小と逆の相関を有する。今回の高速なX線の出射位置の移動は、①ずれ角の変化に追従して、出射位置が高速で変化した可能性と、②超音波照射による格子ひずみ量が高速で変化し、これに比例しながら異常シフト量が追従して変化した可能性、の二通りの可能性がある。後者であれば、超音波によって、シリコン結晶に巨大な応力がかかったことになる。どちらが正解かについては、今後の解明が待たれる。いずれにせよ、スリットを外せば、時間とともに出射位置が

走査される現象がみられるはずである。

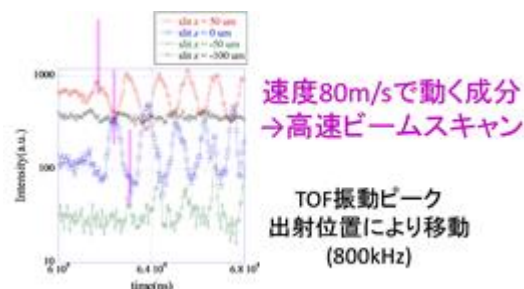


図5. スリット位置を変化させた場合にスリット位置によって、出射光の到達時間が変化した。横すべり量が大きい赤のケースでは、最初に加振の影響がみられていて、逆に横すべり量が小さい緑のケースでは、最後に影響が及んでいる。横すべり量が収縮するメカニズムが働いていると考えられる。

第三の実験で、ダイヤモンド結晶による可視発光を観察し、X線経路の可視化に成功した。ただし、大きな異常シフトを生じるX線に関しては、可視発光量が小さく観察が難しく、可視化が困難だった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3件)

1. D. Takei, Y. Kohmura, T. Ishikawa, and K. Sawada, “Unidirectional X-ray Output from a Crystal Waveguide affected by Berry's Phase”, submitted.
2. D. Takei, Y. Kohmura, Y. Senba, H. Ohashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa, “X-ray collimation by the parabolic cylinder mirror in SPring-8/BL29XUL”, *Journal of Synchrotron Radiation*, **23**, 158 (2016). 審査有
3. 香村芳樹「半導体結晶中の格子ひずみによるX線横すべり現象」, *Isotope News*, No.715, 7-12, 2013. 審査無

[学会発表] (計 5件)

1. 香村芳樹他「結晶歪みの高周波制御による横すべりX線の高速走査」、日本放射光学会年会、2016年1月10日、東京大学柏の葉駅前サテライト(千葉県柏市)

2. 香村芳樹「X線横滑り現象の発見と、結晶表面観察への応用」、トライボコーティング・ドライコーティング合同技術研究会、2015年8月7日、尼崎リサーチ・インキュベーション・センター（兵庫県尼崎市）
3. 香村芳樹他「歪み結晶中を伝搬する横すべりX線の格子欠陥への集束効果」、日本放射光学会年会、2014年1月13日、（広島県広島市）
4. Y. Kohmura et al., “X-ray optics based on Berry-Phase translation effect inside strained crystal”, 第6回International Workshop on FEL Science, 2013年11月4日（台南市台湾）.
5. Y. Kohmura, “Topics on Berry Phase Approach”, Optics Workshop in 3way workshop, 2013年7月31日 Advanced Photon Source施設(米国、シカゴ).

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 出願年月日：  
 国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 取得年月日：  
 国内外の別：

〔その他〕  
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

香村 芳樹 (Yoshiki Kohmura)

国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・ユニットリーダー  
 研究者番号：30270599

(2) 研究分担者

田中 義人 (Yoshihito Tanaka)

兵庫県立大学・物質理学研究科・教授  
 研究者番号：80260222

(3) 連携研究者

澤田 佳 (Kei Sawada)

国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・特別研究員  
 研究者番号：40462692

深津 晋 (Susumu Fukatsu)

東京大学・教養学部・教授  
 研究者番号：60199164