

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560054

研究課題名（和文） 分解能可変・角度分解X線CTの開発と応用

研究課題名（英文） Development and application of resolution-tunable angle-resolved x-ray imaging

研究代表者

平野 馨一（HIRANO KEIICHI）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授

研究者番号：40218798

研究成果の概要：

試料によるX線の屈折をアナライザで検出して像を得る撮像法—角度分解X線撮像法—は、X線の吸収を利用して像を得る従来の撮像法より、遙かに感度が高いという優れた特徴を持っている。これまで角度分解X線撮像法では、アナライザの角度分解能が固定されていたため、一つの光学系で観察できる試料の種類が限られていた。この問題を解決するために、本研究では分解能可変のアナライザを開発し、その評価を行った。これにより角度分解X線撮像法の利便性が大いに向上し、一つの光学系でより多くの試料を観察出来るようになった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：X線光学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物理学一般

キーワード：放射線、X線、イメージング、位相コントラスト、屈折

1. 研究開始当初の背景

1972年に英国のハンスフィールドによって開発されたX線CT（Computed Tomography）技術は、物質内部を三次元的に非破壊観察できるという優れた特徴を持っており、今日、医学、生物学、物質・材料科学、考古学などの様々な分野で大いに利用されている。このような従来のX線CT技術では、物質によるX線の吸収の差を利用して像を得る。しかし近年、X線の位相情報を利用して像を得る新しい技術—位相型X線CT—が急速に発

達しつつあり、大きな注目を集めている。その最大の理由の一つは、位相型の方が吸収型より遙かに感度が高いことである。たとえば、生体を構成する炭素、水素、酸素、窒素、硫黄といった軽元素について調べてみると、位相シフトの相互作用断面積は吸収の相互作用断面積の数百倍～千倍の大きさであることがわかる。そのため、位相型X線CTは特に生体試料やポリマーなどの観察に大きな威力を発揮し、生体軟部組織を無造影で撮影す

ることや、試料へのX線照射線量を大幅に軽減することができる。

X線の位相情報を利用して像を得る代表的手法にはいくつかあるが、その中で最も簡便なのはX線の屈折を利用する方法—角度分解X線撮像法—である。X線が物質に入射すると、物質内の屈折率分布により、X線の進路がわずかに変化する。通常、このX線の屈折角は数 μrad 程度(1秒程度)なので、このようにきわめて小さな屈折角を検出するには高精度の角度アナライザが必要になる。幸いなことに、シリコン、ゲルマニウム、ダイヤモンドなどの完全に近い結晶におけるX線の回折幅がこれと同程度なので、屈折角の検出に利用することができる。しかし残念なことに、従来の角度分解X線撮像法では分解能固定の角度アナライザが用いられてきたため、一つの光学系で観察できる試料の種類は少数に限られ、しかも最適の撮影条件を探すのが困難である、等の問題があった。

2. 研究の目的

角度分解X線撮像法において、撮像の要となる最も重要な要素は角度アナライザである。従来の角度分解X線撮像法では、分解能固定の角度アナライザが使用されてきたため、角度分解能を変えて試料を観察しようとすると、そのつど光学系を組み直す必要が生じ、最適な撮影条件を探すのが困難であった。さらに、一つの光学系で観察できる試料の種類も少数に限られていた。そこで本研究ではこれらの問題を解決するために、分解能可変のアナライザを導入し、その性能評価を行った。次に、新たに開発した装置を用いて生体試料や工業材料などの観察を行った。

またX線二次元検出器も撮像の要であり、高感度・高精細な検出器は角度分解X線撮像法の有力な武器となる。そこでX線 HARP 検出器を導入してその評価を行った。

3. 研究の方法

(1) 分解能可変アナライザとして二結晶アナライザを設計・製作し、高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設 Photon Factory (PF) の BL-14B で評価実験を行った。

(2) 動力学的X線回折理論を用いて、二結晶アナライザの角度分解能のシミュレーションを行った。

(3) 角度分解能を変えた条件下で様々な試料の観察を行った。

(4) 高感度・高精細X線 HARP 検出器を導入し、

その性能評価実験を行った。

4. 研究成果

(1) 分解能可変二結晶アナライザの設計と製作

FZ シリコン単結晶から、(111)や(220)などの反射面を持つアナライザ結晶を数組作成した。またこれらの結晶の角度や位置を調整するための調整機構を作成した。作成した調整機構の写真を図1に示す。

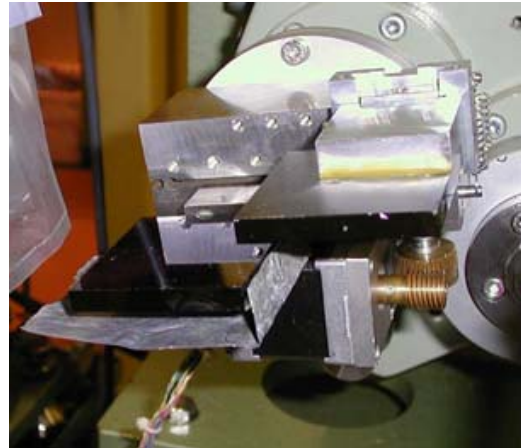


図1 二結晶アナライザの写真

この装置では二結晶の間のオフセット角 $\Delta\theta$ により、角度分解能を連続的に変えることができる。このように角度分解能を連続的に変えられる簡便なアナライザは世界で初めて開発されたものであり、今後、角度分解X線撮像法においてなくてはならない重要な装置になると予想される。

(2) 二結晶アナライザの性能評価

作成した二結晶アナライザの性能評価を PF の BL-14B で行った。実験では波長

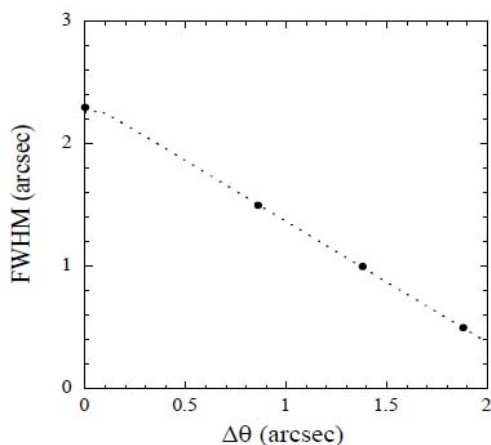


図2 二結晶アナライザの性能評価結果

0.0733nmのX線を用いた。得られた結果を図2に示す(黒丸が実験データ)。オフセット角 $\Delta\theta$ を変えることにより、角度分解能を $0.5''$ から $2.3''$ まで変化させることができた。

(3) 二結晶アナライザの性能シミュレーション

動力学的X線回折理論を用いて、二結晶アナライザの角度分解能のシミュレーションを行った。その結果の一例が図2の点線である。実験結果とシミュレーション結果が見事に一致しており、作成した二結晶アナライザが期待通りの性能を持っていることが確認された。

(4) 各種試料の観察

二結晶アナライザを用いて各種試料の観察を行った。その結果、(i)角度分解能を向上させることにより鮮明な画像が得られる試料、(ii)角度分解能を上げると逆に像が見えにくくなる試料、の2パターンがあることが判明した。つまり、観察対象に応じて最適な角度分解能を選択する必要があることが初めて実証された。

従来の角度分解X線撮像法では角度分解能が固定されていたため最適な条件下で試料を観察することはできなかったが、本研究によりこの制約を打破することができた。

今後、各種試料について最適な観察条件を探索する事が重要な課題の一つである

(5) X線 HARP 検出器の導入と性能評価

高感度・高精細のX線二次元検出器は角度分解X線撮像法の利便性をさらに向上させる上で大いに役に立つ。そこで、高感度・高精細のX線 HARP 検出器を導入し、その性能評価を行った。X線 HARP 検出器でラットの肝臓を観察した結果を図3に示す。図3(a)は増倍率が1の場合で、通常のサチコン管で得られる画像に相当する。それに対して図3(b)は増倍率を40に上げた場合で、図3(a)では見えなかった微細な構造が鮮明に見えている。この結果はX線 HARP 検出器が大いに有用であることを示すものである。

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6件)

① 平野馨一

「直接変換型X線 HARP-FEA 検出器のX

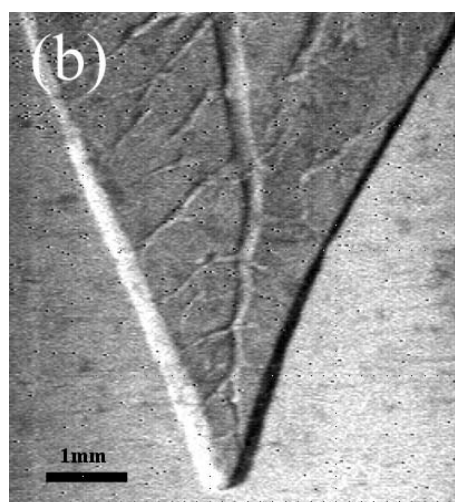
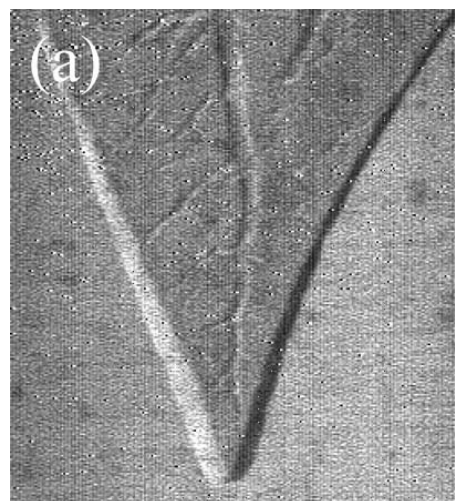


図3 X線 HARP 検出器で観察したラットの肝臓：(a) 増倍率が1の場合、(b)増倍率が40の場合。

線位相イメージングへの応用」(査読有)
X線結像光学ニューズレター No.27
(2008) 1-3.

- ② T. Miyoshi, N. Igarashi, N. Matsugaki, Y. Yamada, K. Hirano, K. Hyodo, K. Tanioka, N. Egami, M. Namba, M. Kubota, T. Kawai and S. Wakatsuki
“Development of an X-ray HARP-FEA detector system for high-throughput protein crystallography” (査読有)
J. Synchrotron Rad. 15 (2008) 281-284.
- ③ K. Mizuno, Y. Furuya, K. Hirano and H. Okamoto
“New determination method of hydrogen diffusivity in titanium-hydrides by means of diffraction-enhanced X-ray

imaging method” (査読有)
MRS-J 32(4) (2007) 855-858.

- ④ K. Mizuno, Y. Furuya, K. Hirano and H. Okamoto
“Hydrogen diffusion in titanium-hydride observed by the diffraction-enhanced X-ray imaging method” (査読有)
phys. stat. sol. (a) 204 (2007) 2734-2739.
- ⑤ K. Hirano, T. Miyoshi, N. Igarashi, T. Takeda, J. Wu, T. T. Lwin, M. Kubota, N. Egami, K. Tanioka, T. Kawai and S. Wakatsuki
“X-ray phase imaging of biological soft tissue using a direct-sensing x-ray HARP tube camera” (査読有)
Phys. Med. Biol. 52 (2007) 2545-2552.
- ⑥ Ando, M., Bando, H., Chen, Z., Chikaura, Y., Choi, C. H., Endo, T., Esumi, H., Gang, L., Hashimoto, E., Hirano, K., Hyodo, K., Ichihara, S., Jheon, S., Kim, H., Kim, J., Kimura, T., Lee, C., Maksimenko, A., Ohbayashi, C., Park, S. H., Shimao, D., Sugiyama, H., Tang, J., Ueno, E., Yamasaki, K. and Yuasa, T.
“2D and 3D Refraction Based X-ray Imaging Suitable for Clinical and Pathological Diagnosis” (査読有)
AIP Conf. Proc. 879 (2007) 1899-1902.
- ⑦ E. Hashimoto, A. Maksimenko, H. Sugiyama, K. Hirano, D. Shimao, Y. Nishino, T. Ishikawa, T. Yuasa, S. Ichihara, Y. Arai and M. Ando
“High Quality Image of Biomedical Object by X-ray Refraction Based Contrast Computed Tomography” (査読有)
AIP Conf. Proc. 879 (2007) 1979-1983.

[学会発表] (計10件)

- ① 平野馨一、三好敏喜、五十嵐教之、武田徹、呉勁、Thet-Thet-Lwin、谷岡健吉、江上典文、難波正和、久保田節、河合輝男、若槻壮市
「X線HARP-スピント検出器の位相イメージングへの応用」
第22回日本放射光学会年会(東京大学本郷キャンパス、2009年1月)
- ② 平野馨一、丹羽尉博、稲田康宏、野村昌

治、松田康弘

「X線透過型移相子の波長分散型分光計への導入」

第22回日本放射光学会年会(東京大学本郷キャンパス、2009年1月)

- ③ 平野馨一、三好敏喜、五十嵐教之、武田徹、呉勁、Thet-Thet-Lwin、谷岡健吉、江上典文、難波正和、久保田節、河合輝男、若槻壮市
「X線HARP-SPINDT検出器による角度分解X線イメージング」
日本物理学会・2008年春「第63回年次大会」(近畿大学、2008年3月)
- ④ 金井貴志、藤下豪司、岡本博之、平野馨一、水野薫
「DEI法によるチタン中の水素化物の観察」
日本物理学会・2008年春「第63回年次大会」(近畿大学、2008年3月)
- ⑤ 橋本英子、Anton Maksimenko、杉山弘、平野馨一、市原周、森健策、島雄大介、兵藤一行、湯浅哲也、新井嘉則、森浩一、安藤正海
「屈折原理に基づくX線CTの分解能評価」
第21回日本放射光学会年会(立命館大学びわこ草津キャンパス、2008年1月)
- ⑥ 岡本博之、金井貴志、平野馨一、水野薫
「非対称反射アナライザーを用いたDEI法によるチタン中の水素化物の観察」
第21回日本放射光学会年会(立命館大学びわこ草津キャンパス、2008年1月)
- ⑦ 平野馨一、三好敏喜、五十嵐教之、若槻壮市、武田徹、呉勁、Thet-Thet-Lwin、谷岡健吉、江上典文、難波正和、久保田節、河合輝男
「X線HARP-FEA検出器の角度分解イメージングへの応用」
第21回日本放射光学会年会(立命館大学びわこ草津キャンパス、2008年1月)
- ⑧ 平野馨一、三好敏喜、五十嵐教之、若槻壮市、武田徹、呉勁、Thet-Thet-Lwin、谷岡健吉、江上典文、久保田節、河合輝男
「X線HARP検出器による角度分解イメージング」
日本物理学会・2007年秋季大会(北海道大学、2007年9月)
- ⑨ K. Hirano, T. Miyoshi, N. Igarashi, T. Takeda, J. Wu, T. T. Lwin, M. Kubota,

N. Egami, K. Tanioka, T. Kawai and S. Wakatsuki

“ Applications of an x-ray HARP detector to x-ray phase-contrast imaging”

BSR2007 (Manchester, England, 2007)

- ⑩ T. Miyoshi, M. Kobayashi, N. Igarashi, N. Matsugaki, Y. Yamada, K. Hirano, K. Hyodo, K. Tanioka, T. Kawai, M. Kubota, N. Egami, M. Namba and S. Wakatsuki

“Development project of a new X-ray HARP-FEA detector and its application”

BSR2007 (Manchester, England, 2007)

[図書] (計1件)

- ① 大橋治彦・平野馨一 編
「放射光ビームライン光学技術入門」
(日本放射光学会、2008年、410ページ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平野 馨一 (HIRANO KEIICHI)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造
科学研究所・准教授

研究者番号：40218798

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者