



2022年11月6日 PF研究会



# 2ビーム利用の検討状況

## ～ X線光学・イメージング分野 ～

KEK-IMSS-PF

亀沢知夏、杉山弘、平野 馨一

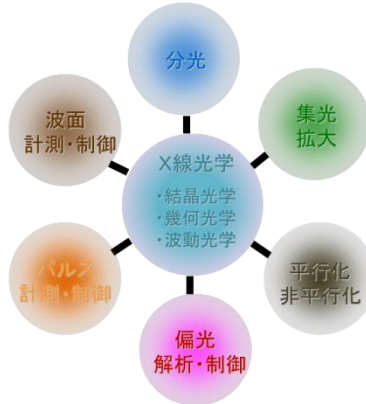


# 1. X線光学・イメージングBL群の現状

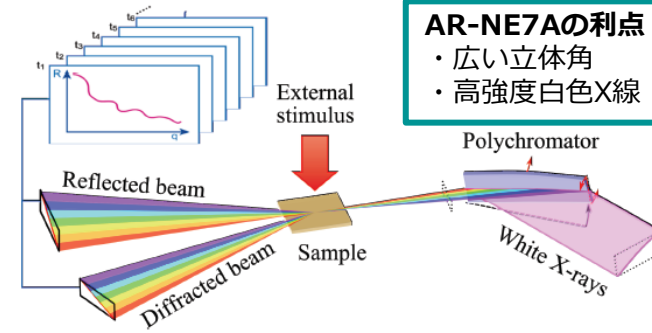


～ 代表的な測定手法・研究例 ～

## X線光学研究

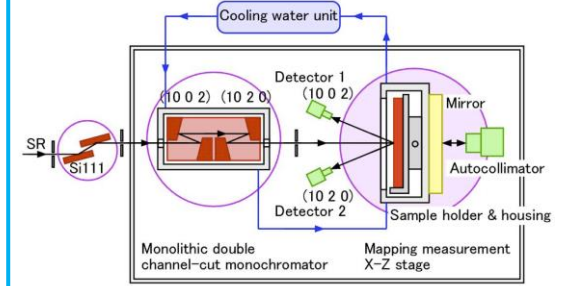


## 分散型X線反射率計



材料科学・物質科学

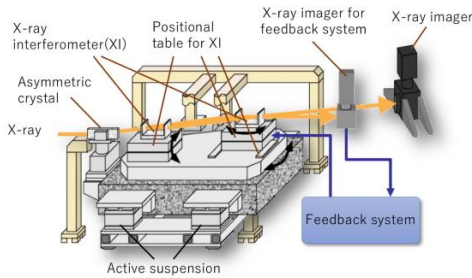
## アボガドロ定数の超精密測定



自己参照型X線格子比較器の概念図

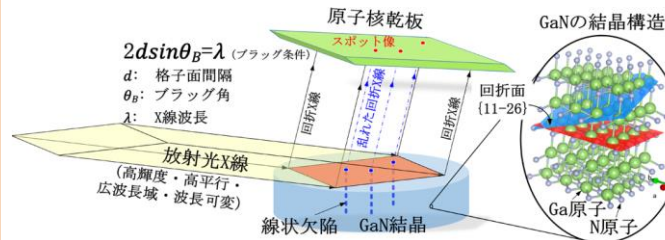
半導体結晶内の超微小歪み・欠陥の検出

## 超高感度・大視野X線位相イメージング



サーモグラフィ等への展開

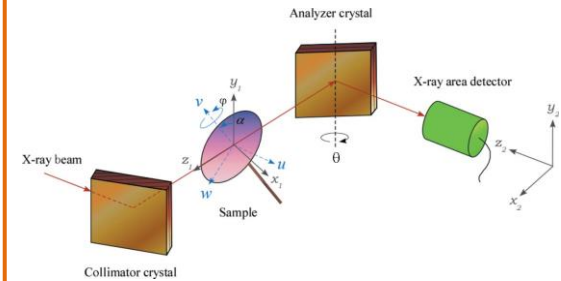
## X線トポグラフィー



表面・界面選択X線トポグラフィー

ワイドギャップ半導体等の評価

## マルチモーダルX線イメージング



ズーミング、ラミノグラフィーへの展開

工業材料、生体試料等の非破壊観察

主な用途: X線光学 & 大視野X線イメージング & 精密X線回折 & X線反射率



## 2. R&Dビームラインへの展開の検討 ～ 2ビーム (HX & SX) 同時利用の場合 ～



< HXとSXの2ビームを同時利用する構成 >

### → HX と SX による複合分析

- ・ (主として) HXでは物質の構造を、SXでは電子状態を見る
- (主として) HXではバルクや埋もれた界面を、SXでは表面近傍を見る

複合分析

#### SX利用測定法

光電子分光 SXPS  
光電子回折 PhD  
吸収分光 XAS etc.



#### HX利用測定法

光電子分光 HAXPES  
吸収分光 XAS

#### X線定在波法 XSW

(表面吸着原子の位置測定)

+ 反射率 (表面薄膜測定)

#### + 表面・界面選択トポグラフィ

(結晶内のマクロな歪み場や欠陥の観察)

これまで主に大気中で利用されてきたHXの  
測定手法を真空中でも利用できるようにする  
だけでも一苦労かもしれない

→ R&D の必要性!

#### 開発要素:

#### HX偏光制御/解析素子の開発・導入

応用例)

XMCD-CTによる磁気ベクトルの3Dイメージング

今後ユーザーの方々と検討を継続



### 3. Hybrid Ringへの展開の検討 ～ 2ビーム (HX & HX) 同時利用の場合 ～



< HXとHXの2ビームを同時利用する構成 >

#### プローブ×プローブ

具体例1. 2ビーム2エネルギーによるX線イメージング

→肺動脈静脈+気管のエネルギー別イメージング

#### ポンプ×プローブ

具体案1. トポグラフィによるその場観察

→半導体のX線損傷評価、将来は宇宙開発に貢献、素核の人との連携の可能性

→ 結晶がX線照射により溶けていく様子の観察

具体例2. X線イメージングによる放射線治療関連についてのその場観察

→DDSの薬剤放出のその場観察

→ 放射線治療による周辺領域の影響をその場観察

→ オージェ電子治療の様子をその場観察



### 3. Hybrid Ringへの展開の検討 ～ 2ビーム (HX & HX) 同時利用の場合 ～

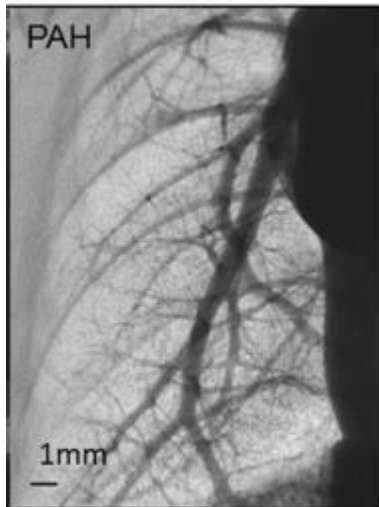


#### プローブ (HX・SR)×プローブ (HX・SR)

#### 2ビーム2エネルギーによるX線イメージング

生きている生体の血管と気管の動きを同時に動的観察

血管：液体造影剤  
(I、吸収端33.2 keV)



S. Fuji et al., Gen Thorac  
Cardiovasc Surg (2016) 64:597–  
603

気管：気体造影剤  
(Xe、吸収端34.6 keV)



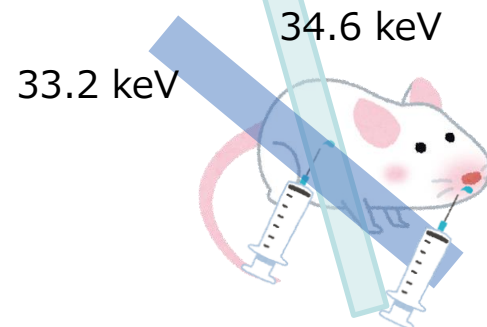
S Bayat et al 2001 Phys. Med. Biol. 46 3287

肺胞の機能の理解には、同時に血流と呼吸の様子を観察することが必要

Understanding the lung function on the alveolar level requires high-resolution mapping of **ventilation and perfusion simultaneously**.

S Bayat et al, Physica Medica 79 (2020) 22–3

#### プローブ×プローブによる同時観察





### 3. Hybrid Ringへの展開の検討 ～ 2ビーム (HX & HX) 同時利用の場合 ～



#### ポンプ (HX・SR) ×プローブ (HX・SR) 治療と診断の融合

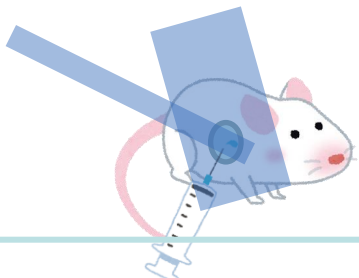
X線イメージングによる放射線治療関連についてその場観察

・ DDS (ドラッグデリバリーシステム) の薬剤放出のその場観察

**X線の照射によってキャリアが崩壊し、内包薬剤が放出**

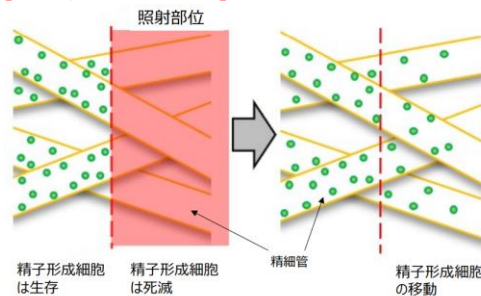
これまでにドラッグ運搬分子が抱えてきた問題点: 「例えば、薬剤放出の不完全さに起因する不十分な薬効発現」はX線を用いることによって解決できる[1]

[1]K. Tanabe, Drug Delivery System 30-5, 2015, など



・ 放射線照射治療による周辺領域の影響をその場観察

**ストライプ状にX線照射することで、均一に照射した場合では起こらない組織機能の回復が生じた (PF、BL-27)**



精細管を通り、照射部位へ正常な細胞が移動するモデル[2,3]

[2]<https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/PR20190930.pdf>

[3]Fukunaga, et al. Sci Rep 9, 12618 (2019).

・ オージェ電子治療の様子をその場観察

**ナノ粒子をがん細胞のかたまりに取り込ませ、放射光を照射しオージェ電子を発生させることでがん細胞を攻撃 (SP8, BL14B1)**

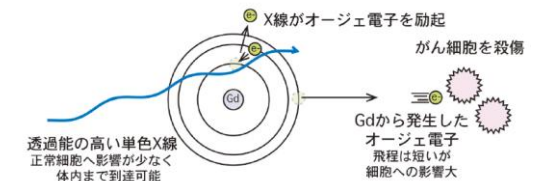


図2 オージェ電子によるがん殺傷効果の模式図  
単色X線やGdナノ粒子に照射し、細胞への影響が大きいオージェ電子によりがん細胞を殺傷する。正常細胞中は透過力が高い単色X線が透過し、飛程が短いオージェ電子はがん細胞以外の細胞には届かないと期待できる

様々な量子ビームとナノ材料の組み合わせが可能[4]

[4].玉ノ井他, Isotope News 2020 8月号 No. 770.

治療と同時に開始する内部の変化 (例: 薬剤放出、精細管内部移動など) を観察対象に応じた最適なX線イメージングにより観察



## 4. 現在の検討状況のまとめ

- X線光学・イメージングビームライン群では、X線光学、大視野X線イメージング、精密X線回折、X線反射率などの研究・開発や、その物質科学・生命科学などへの応用が行われてきた。
- これまで培ってきた測定技術・測定法をHybrid Ring や R&Dビームラインで有効活用することを検討中。
- <HXとSXの2ビームを同時利用する構成>のR&Dビームライン  
HXとSXによる複合分析に向けた開発を行う。  
例) ・高分解能X線分光器、X線偏光制御/解析素子の導入・評価
  - ・ X線定在波法による表面吸着原子の位置測定
  - ・ X線反射率法による表面薄膜測定
  - ・ 表面・界面選択X線トポグラフィによる結晶内のマクロな歪み場や欠陥の観察
- <HXとHXの2ビームを同時利用する構成>のHybrid リング  
プローブ (HX・SR)×プローブ (HX・SR)  
具体例1. 2ビーム2エネルギーによるX線イメージング  
ポンプ (HX・SR)×プローブ (HX・SR)  
具体案1. トポグラフィによるその場観察  
→半導体のX線損傷評価、将来は宇宙開発に貢献、素核の人との連携の可能性  
→ 結晶がX線照射により溶けていく様子の観察  
具体例2. X線イメージングによる放射線治療関連についてのその場観察