





に約 $10^7$  photons/sec程度で、フェムト秒X線用の90度衝突時には約 $10^6$  photons/sec程度である。測定可能な試料の大きさは、X線取り出し窓(Be窓)や検出器の位置で制限されるが、3cm~5cm程度である。現状のセットアップでは、衝突点の下流約2m地点に約3cmφのベリリウム窓を設置している。分解能は検出器(X線CCDカメラやImaging Plate)のスペックに制限されるため60~80μm程度であるが、根本的には、電子ビームとレーザーのサイズ(約30~40μm)が光源サイズを決めているため、光源の持つ分解能のポテンシャルは更に高いと言える。

### 3.1 インライン位相コントラストイメージング

インライン位相コントラスト法(屈折コントラスト法)は、微小光源で空間コヒーレンスの高いX線を用いることで、サンプル中の境界における僅かな密度差による位相シフト(屈折)を利用し、サンプルから適度な距離にある検出器上で、X線の粗密によるエッジ強調画像を得ることが出来る手法である(図5)。この手法は、吸収が少ない場合でもコントラストの高い画像が得られ、特に生体組織においては、組織と軟骨や空気の層などの境界を明確に可視化できることが知られている。現在産総研では、茨城県立医療大との共同研究において、この手法を用いた骨組織の高精細イメージングの研究を行っている。これまでにラットの腰椎を用いたマイクロフォーカスX線管との比較<sup>[8]</sup>や、基節骨折<sup>[9]</sup>、卵巣摘出マウスの後肢<sup>[10]</sup>などのインライン位相コントラストイメージングに成功しており、将来の骨疾患の早期診断の実現を目指している。

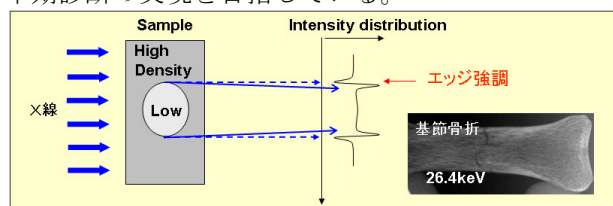


図5:インライン位相コントラスト法

### 3.2 ヨウ素造影剤を用いた血管造影

レーザーコンプトン散乱X線では、その準単色性を利用し、ヨウ素造影剤のK殻吸収端にピンポイントに合わせた血管造影が実現できる。そのため、低侵襲でリアルタイムな高精細イメージングが可能となる。産総研では、国立循環器病センター研究所や東海大との共同で、図6に示すような家兎の耳の血管造影をリアルタイムで撮影することに成功している<sup>[10]</sup>。図6では、500μm程度の血管造影を1フレーム/秒の動画撮影を行った際の1フレーム画像であるが、ピコ秒X線(パルス幅約3ps(rms))は、10パルス/秒で照射されるため、たかだか30ps程度の照射時間となる。同時に、分解能チャートによる評価では、ピコ秒X線1パルスでの撮像にも成功しており、高精細な低侵襲リアルタイムイメージングの実現が

期待される。

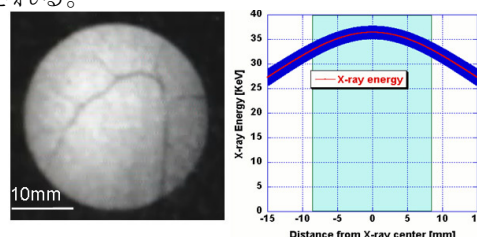


図6:血管造影(ヨウ素)とエネルギー分布

## 4. まとめ

Sバンド小型リアックを用いたレーザーコンプトン散乱X線発生装置では、約 $10^7$ photons/secのシングルパルスX線を生成し、準単色でエネルギー可変(10~40keV)、微小光源といった性質を利用し、骨組織のインライン位相コントラストイメージングや吸収端を利用した血管造影など、医用イメージングへの応用展開を行ってきた。更に、X線収量増強研究として、マルチ衝突レーザーコンプトン散乱のための要素技術開発、及び数パルスのマルチパルスX線生成に成功し、X線収量2桁増強への目処がたった。今後は、リアルタイムで高精細な医用イメージングを実現していき、高度医療診断装置としての早期実用化を目指して開発を進めていく予定である。

最後に、本研究に関して、産総研関係者の方々はもちろん、システム全体の開発、及びレーザー開発に関しては、住友重機械工業(株)の酒井氏、中條氏、柳田氏(現 コマツ)に、Cs-TeフォトカソードRF電子銃開発では、KEKの浦川先生・早野先生・照沼先生をはじめとするKEK-ATF、KEK工作センターの方々、及び京大紀井先生、阪大楊先生、早稲田大学鷲尾研究室の方々に、多大なご協力をいただきました。また、医用イメージングへの応用研究において、血管造影研究に関しては、国立循環器病センター研究所の盛先生(現 東海大医学部)、東海大医学部の福山先生、岩手医大の佐藤先生、NHKエンジニアリングサービスの白石氏、浜松ホトニクス河合氏、渥美氏に、骨組織イメージングに関しては、茨城県立医療大の森先生に、甚大なるご支援をいただきました。皆様に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] NEDO 電子・情報技術開発部平成16年度終了プロジェクト事後評価報告資料
- [2] 黒田隆之助 他、加速器、5巻2号、137、2008
- [3] R. Kuroda et al., Int. J. Mod. Phys. B, 21, 488, 2007
- [4] N. Terunuma et al., Nucl. Instr. Meth. A, 613, 1, 2009
- [5] R. Kuroda et al., Nucl. Instr. Meth. A 593, 91, 2008
- [6] R. Kuroda et al., Proceedings of EPAC'08, 1878, 2008
- [7] R. Kuroda et al., Nucl. Instr. Meth. A 608, S28, 2009
- [8] H. Ikeura-Sekiguchi, R. Kuroda et al., Applied Physics Letters 92, 131107, 2008
- [9] R. Kuroda et al., Nucl. Instr. Meth. A, 2010 (in press)
- [10] K. Yamada, R. Kuroda et al., Nucl. Instr. Meth. A 608, S7, 2009