X-RAY IMAGING OPTICS

X 線結像光学ニューズレター

No.39 2014 年 4 月発行

エッジ走査フィルターを用いた X 線微分位相コントラスト顕微鏡の開発と位相トモグラフィーへの応用

筑波大学数理物質科学研究科　　渡辺紀生

１．はじめに

X 線エネルギーを数 keV 以上にすると、100 μm を超える比較的厚い試料の観察が可能となることや試料周りを大気中にできること、また一般的に焦点深度が深くなるため CT による３次元観察に適するなど多くの利点がある。しかし、生物試料等の軽元素で構成された試料ではほとんどコントラストがつかなくなってしまうという問題がある。これを解決するために、様々な位相コントラスト顕微法が開発されてきた。X 線の吸収ではなく位相の変化を観察すれば、コントラストが２桁～３桁向上するため、X 線にはほとんど透明な生物試料でも十分なコントラストで観察することができる。さらに、結像型 X 線顕微鏡において定量的な位相結像が実現すると、CT の手法によって容易に高感度な３次元観察が可能となるという利点がある。

位相コントラスト観察法として広く用いられている方法に Zernike 型位相差顕微鏡がある。この方法の利点は高い位相コントラスト像が得られることであるが、位相の定量性に欠けるという欠点がある。我々も Photon Factory の偏向電磁石光源 BL3C においてゾーンプレートを用いた Zernike 型位相差顕微鏡実験を行っているが、この位相差像を用いて CT 再構成を行うと位相の定量性が無いために試料内部をうまく再構成することが出来なかった[1]。そこで、比較的定量的な微分位相像が得られる方法として、ゾーンプレート後焦点位置にて露光中に半平面状のエッジを走査する方法を適用した[2]。この方法は、最初に電子顕微鏡において定量的位相像を得る方法として開発されたものである[3]。

図１に我々が実験を行っている X 線顕微鏡光学系を示す。２結晶分光器からの 5～8 keV の平行 X 線ビームで試料を照射してゾーンプレートで拡大結像している。平行 X 線で照明する方法は視野の均一性や分解能の点では好ましくないが、試料のフーリエ変換面がゾーンプレート後焦点面に出来るため、様々な位相コントラスト観察法を容易に切り替えて実現することが出来る。図２にその例として、ポリスチレン球の位相差像とシュリーレン像を示す。本研究におけるエッジ走査フィルターもこのシュリーレン像と同様の光学系であるが、露光中にエッジをそれぞれ逆方向に走査した２枚の画像を用いることによってより定量性の高い微分位相像を得ることに成功している。

結像型 X 線顕微鏡による定量的位相結像の方法としては、他にゾーンプレート干渉計[4]のような方法もあるが、波面分割による２光束干渉では一般に高い空間コヒーレンスを必要とするため、第三世代以降のアンジュレーター光源でないと実現が難しい。比較的低コヒーレンス光源で実現可能な方法では微分干渉顕微鏡が、２枚の近接したゾーンプレートをわずかにずらせて作成する方法[5]や、１枚のゾーン

プレート中にゾーンプレートパターンを反転させた領域を形成する方法[6]によって実現されている。また、ゾーンプレートX線顕微鏡に回折格子を挿入して Talbot 効果によって位相差分像を得る方法でも定量的な位相結像が成功している[7]。これらの方法に対する本手法の利点としては、特別な光学素子を用意しなくても実現可能であることが挙げられるが、エッジで入射X線の半分を切るため像の強度が半分になるという欠点もある。

本論文では、以下にこのエッジ走査フィルターを用いた位相再構成の理論と実験結果との比較、及び位相トモグラフィーへの応用について述べる。

２．エッジ走査フィルターによる微分位相結像理論

図３(a)に理論的考察のために使用した光学系を示す。ここでの再構成式の導出はほぼ永山の論文[3]に沿っているが、X 線顕微鏡においてフィルター走査幅が広いと像のコントラストが非常に悪化するため、新たにエッジの走査幅の要素を加えた定式化を行った[8]。

ここでは光学系の倍率を１倍とし、物体面の振幅 $f(x)$ のフーリエ変換 $F(\mu)$ がレンズ後焦点面での振幅となり、そのフーリエ逆変換が像面での振幅 $f(x)$ となると仮定する。通常は２回フーリエ変換を行い像面では物体が反転するが、ここでは像面の座標の向きを反転させて、フィルターが存在しない場合に物体面と像面の振幅が同じ関数 $f(x)$ で記述できると仮定する。また、座標は微分像の微分方向に関係した１次元で考え、これを x 軸とする。

$f(x)$ のフーリエ変換 $F(\mu)$ における μ は物体の空間周波数に対応しているが、これは後焦点面上での位置にも対応している。後焦点面において、光軸から μ 軸方向に距離 w 離れた位置は、対応する空間周波数を S とすると、

$$S = \frac{w}{f\lambda} \tag{1}$$

の関係がある。ここで f はレンズの焦点距離、λ は波長である。ゾーンプレートを用いた場合、その半径を r_n、最外輪帯幅を dr_n とすると $f = 2r_n dr_n / \lambda$ と近似できるので、

$$S = \frac{w}{2r_n dr_n} \tag{2}$$

となる。

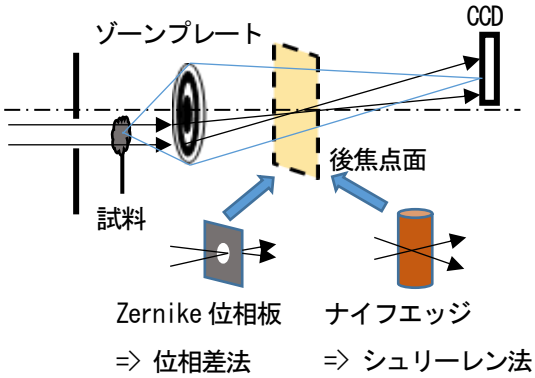
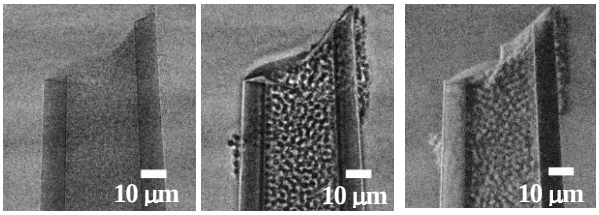


図１　X 線顕微鏡において試料を平行光で照明した場合、ゾーンプレート後焦点面にできるそのフーリエ変換パターンに変調を加えることによって、種々の位相コントラスト像が得られる。位相を π/2 進める膜で作製したピンホールを置くと位相差像が得られる。半平面を遮断するようにナイフエッジを置くとシュリーレン像が得られる。



(a) 明視野像　(b) 位相差像　(c) シュリーレン像

図２　ガラスキャピラリに詰めたポリスチレン球（直径 2.8 μm）の 5.36 keV における X 線像。

ここでは試料として、ある空間周波数 S 以上の空間周波数成分は含まないような物体を仮定する。物体の振幅透過率を以下の式

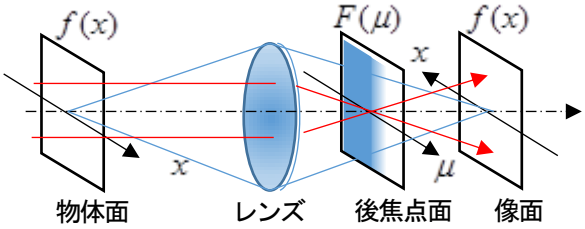
$$f(x) = e^{-g(x)} e^{i\phi(x)} \tag{3}$$

で与える。ここで、$g(x)$ 及び $\phi(x)$ はどちらも実関数で、$\phi(x)$ は物体による透過光の位相変化を表す。

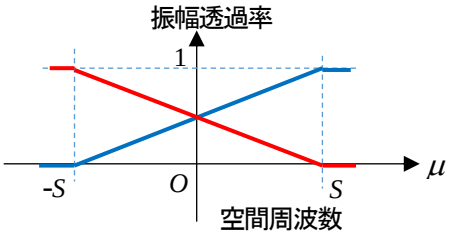
また、図３(b)に示す青線及び赤線で示した振幅透過率$T_+(\mu)$，$T_-(\mu)$ を持った２種類のフィルターを考えると、これらは次の式

$$T_\pm(\mu)=\frac{1}{2}\left(1\pm\frac{\mu}{S}\right)\qquad |\mu|\le S \tag{4}$$

で与えられる。



(a) 計算で用いた光学系



(b) 後焦点面における振幅透過率フィルター

図３　位相像の計算で用いた光学系。簡単のため、座標はx軸のみを考慮し、倍率は１倍とした。レンズの開口の影響は考慮せず、また像面のx軸を逆向きにして、後焦点面にフィルターが無い場合に物体面と像面の関数形が等しくなるように設定した。

これら２種類のフィルター$T_+(\mu)$，$T_-(\mu)$ を用いた場合の像面での振幅をそれぞれ$A_+(x)$、$A_-(x)$とすると、これらは$F(\mu)$にフィルター関数を掛けて逆フーリエ変換することによって求められ、

$$\begin{aligned}A_\pm(x)&=\int_{-\infty}^{\infty}T_\pm(\mu)F(\mu)\exp(i2\pi x\mu)d\mu\\&=\frac{f(x)}{2}\left(1\pm\frac{1}{2\pi S}\frac{d\phi(x)}{dx}\pm\frac{i}{2\pi S}\frac{dg(x)}{dx}\right)\end{aligned} \tag{5}$$

となる。したがって像面での強度は、

$$\begin{aligned}I_\pm(x)=|A_\pm|^2&=\frac{1}{4}|f(x)|^2\left[1\pm\frac{1}{\pi S}\frac{d\phi(x)}{dx}\right.\\&\left.+\frac{1}{4\pi^2S^2}\left\{\left(\frac{dg(x)}{dx}\right)^2+\left(\frac{d\phi(x)}{dx}\right)^2\right\}\right]\end{aligned} \tag{6}$$

となる。

それぞれのフィルターに対応した２つの像の差および和は、

$$I_+(x)-I_-(x)=\frac{1}{2\pi S}|f(x)|^2\frac{d\phi(x)}{dx} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}I_+(x)+I_-(x)&=\frac{1}{2}|f(x)|^2\left[1+\frac{1}{4\pi^2S^2}\right.\\&\left.\times\left\{\left(\frac{dg(x)}{dx}\right)^2+\left(\frac{d\phi(x)}{dx}\right)^2\right\}\right]\cong\frac{1}{2}|f(x)|^2\end{aligned} \tag{8}$$

と表される。ここでは、$g(x)$ および$\phi(x)$ の微分に関する２次の項は十分に小さいと仮定して近似を行った。このとき、物体の微分位相像は

$$\frac{d\phi(x)}{dx}=\pi S\left(\frac{I_+(x)-I_-(x)}{I_+(x)+I_-(x)}\right) \tag{9}$$

となる。

この計算で用いた(4)式のフィルター関数は、位相が変化せず振幅のみ線形に変化するものであった。X線領域でこのようなフィルターを作製することも理論的には可能である。X 線における複素屈折率を$n=1-\delta+i\beta$と表したとき、δ/βの大きく異なる２種類の物質を用いれば、適当な一定のバイアスはかかるが振幅のみ変化するフィルターを作製できる。例えば銅とポリイミドでは、5.4 keV の X 線ではδ/βは約 10 倍異なる。このようなフィルターの使用も検討しているが、現段階ではできていない。

ここでは、図３(b)で表される(4)式の振幅透過率フィルターを、露光中に半平面状のエッジを走査することで置き換えることを考える。$T_+(\mu)$のフィルターならば、負の側に広がる半平面のエッジの先端を、空間周波数S に対応する後焦点面上の距離wを用いて$-w$からwまで露光中に等速度で走査することを考える。つまり、振幅透過率を強度の透過率

で置き換え、この強度透過率を後焦点面での開口時間で設定することを考える。

このエッジ走査フィルターの走査幅を等間隔に N 個サンプリングして、それぞれのエッジ位置における像面上の振幅を $A_1, A_2, \cdots, A_n$ とした場合、(4)式の振幅透過率フィルターを用いた場合には像の強度 I を、

$$I = \left| A_1 + A_2 + \cdots + A_N \right|^2 \tag{10}$$

で計算することを意味し、エッジ走査フィルターの場合には強度 I を、

$$I = \left| A_1 \right|^2 + \left| A_2 \right|^2 + \cdots + \left| A_N \right|^2 \tag{11}$$

で計算することを意味する。後焦点面において正の向きおよび負の向きに走査したエッジ走査フィルターを用いて(11)式のように強度の和を計算して得られた像の強度を改めて $I_+(x)$ 及び $I_-(x)$ と設定してこの差を計算すると、この場合でも(7)式が成立することが示されている[3]。しかしながら、像の和を計算すると(8)式は、

$$I_+(x) + I_-(x) \cong \left| f(x) \right|^2 \tag{12}$$

となる。このことは、以下のように推測される。後焦点面及び像面を、それぞれフーリエ変換対の関係にあるような M 点でサンプリングすると、それぞれの面における要素の絶対値の２乗和はパーセバルの定理から等しくなるはずである。正の方向及び負の方向に走査するフィルターには互いに相補的な位置となるペアが存在するので、その２つを組み合わせると、後焦点面における要素の絶対値の２乗和を全てカバーする。したがって、$I_+(x) + I_-(x)$ の全画素の和は、フィルターを用いない場合の１枚の画像の画素の和に等しい。これは全画素の和についてしか言及していないが、それぞれの画素の値についてもそれに近い値が得られることが期待される。それに従って改めてエッジ走査フィルターを用いた場合の位相再構成式を表すと、

$$\frac{d\phi(x)}{dx} = 2\pi S\left(\frac{I_+(x) - I_-(x)}{I_+(x) + I_-(x)} \right) \tag{13}$$

となる。

３．微分位相結像の理論と実験との比較

実験に用いた光学系は図１に示したとおりである。ゾーンプレートには、半径 r_n=165 μm, 最外輪帯幅 dr_n=50 nm のもの（NTT AT 製）を用いた。ゾーンプレートによる拡大率は 48 倍で、検出器として用いた CCD（浜松ホトニクス、C4742）のピクセルサイズは 13 μm であった。試料面上に換算したピクセルサイズは 0.27 μm で、これはゾーンプレートの空間分解能よりも悪い。したがって、このピクセルサイズが光学系の空間分解能を決めている。用いた X 線は 5.36 keV で、このときゾーンプレート焦点距離は 71.3 mm であった。

顕微鏡像のシミュレーション計算を、エッジ走査方向にのみサンプリングした１次元データについて行った。試料の振幅透過率をピッチ 0.1 μm, 2048 点でサンプリングし、フーリエ変換を行った。このデータは、ゾーンプレート後焦点面での振幅分布を与えるが、その間隔は周期がデータの幅 204.8 μm の回折格子が作る 0 次と 1 次回折光の集光点の間隔に等しく 0.0805 μm となる。走査エッジフィルターの計算では、エッジをこの間隔で動かしてそれぞれのエッジ位置における像面の振幅を逆フーリエ変換して求め、それらの絶対値２乗の和を計算することによって像の強度を求めた。テストサンプルとして、直径 25 μm のアルミニウムワイヤーを用いた。振幅透過率は Henke のテーブル[9]から計算して求めた。

図４は、図３に示した振幅透過率フィルターとエッジスキャンフィルターの場合のそれぞれの $I_+(x)$ 及び $I_-(x)$ を求めてその差画像と和画像のプロファイルを比較して示したものである。差画像ではほぼ完全に一致しており、和画像の方も振幅透過率フィルターにおける像を２倍するとほぼ一致することがわかる。

実験データとの比較は、得られた微分像を積分し

た位相像について行った。実験で得られた像のピクセルサイズをΔ_x=0.27 μm として、この間隔で(13)式を離散化すると、

$$\Delta\phi(x) = 2\pi S\Delta_x\left(\frac{I_+(x)-I_-(x)}{I_+(x)+I_-(x)}\right) \qquad (14)$$

となる。この$\Delta\phi(x)$を走査方向に積分することによって、微分像を位相像に変換した。しかしながら、

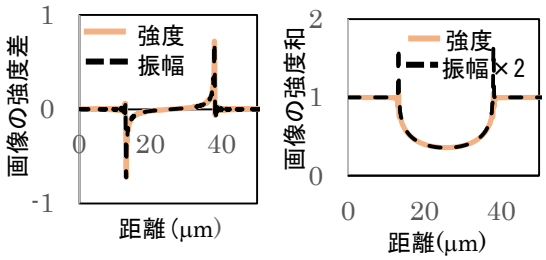


図４　アルミニウムワイヤー（直径 25 μm）のエッジ走査フィルターシミュレーションプロファイル。橙のラインは各エッジ位置での像の強度和を計算して互いに逆向きに走査した 2 枚の画像を求めた場合のプロファイル。点線は、振幅の和の２乗で２枚の画像を求めた場合のプロファイルに相当する。計算は、ピッチ 0.1 μm で試料面を 2048 点サンプリングし、フィルター走査幅 30 μm で計算を行った。

図５に示すように実験データから計算した位相プロファイルでは比較的大きな位相勾配が生じてしまった。図５では、正の方向へ走査するエッジの原点を 0.65 μm（後焦点面において 8 ピクセル）ずらせた場合のシミュレーション結果も同時に示しているが、ほぼ実験データの位相勾配に対応している。このことから、この位相勾配は２枚の画像の走査位置のずれが原因と考えている。実験において、このような位相勾配が出来ないような走査が望ましいが、現状ではまだ解決できていない。そこで、完全ではないが簡単な方法として、注目している領域の全画素値の和が２枚の画像で等しくなるように適当な定数を片方の画像に掛けることによって補正を行った。以下の実験データではそのような補正を行ったデータを示した。

エッジ走査フィルターによって CCD カメラで記録される像のコントラストは、エッジの走査幅に大きく影響を受ける。これは、(13)式で表される微分位相像の左辺はエッジ走査幅にそれほど影響されないが、右辺には走査幅に比例するパラメータ S が存在するため、逆に記録される X 線像そのもののコントラストが低下すると説明できる。逆に位相プロファイルは、図６(b)に示すように S が掛かっているため走査幅が大きいほど向上する。

図６(c)に走査幅に対する再構成位相プロファイルのシミュレーション結果を示す。サンプリングピ

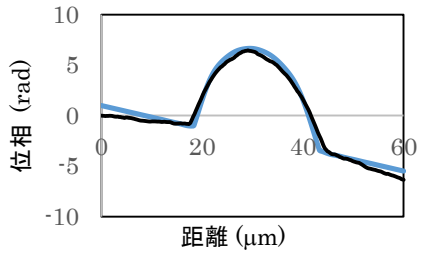
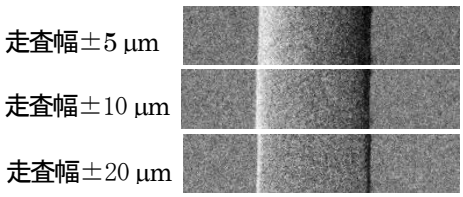


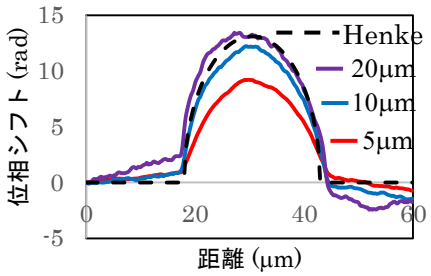
図５　アルミニウムワイヤー（直径 25 μm）の位相再構成プロファイル実験結果（黒線）とシミュレーション結果（青線）の比較。実験結果は、互いに逆方向に走査するフィルターの片方の原点を 0.65 μm シフトさせることでほぼ一致させることができた。エッジ走査幅: ±5 μm。

ッチ 0.27 μm のナイキスト空間周波数に対する走査幅を計算すると、31 μm となる。また、試料を平行光でコヒーレント照明した場合のゾーンプレートの遮断空間周波数に対応する走査幅は(2)式から、ゾーンプレートの半径に相当する 165 μm となる。実験では、走査幅を 30 μm に設定してもかなり CCD 画像のコントラストが低下するため、走査幅は±5 μm または±10 μm に設定して実験を行った。図６(c)のシミュレーション結果では、走査幅を±10 μm に設定してもそれほど再構成位相値の低下は無い。走査幅±5 μm では、それに対応する空間周波数 S を

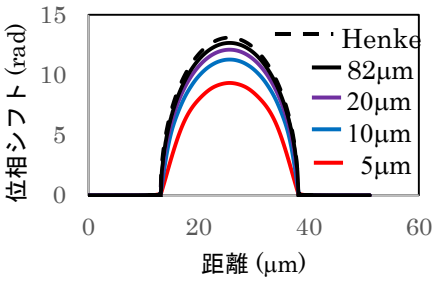
ピッチで表すと 3.3 μm となる。理論的な位相再構成式の導出では、試料にそれ以上細かい構造は無いものと仮定して計算を行っていたが、実際の実験では走査幅±5 μm でもそれ以上細かな構造が位相コントラスト像として観察できている。走査幅を外れた部分の空間周波数成分が微分位相像にどのように影響するかの考察はまだ出来ていない。



(a) 各走査幅に対する$(I_+ - I_-)/(I_+ + I_-)$画像。



(b) 位相再構成プロファイル

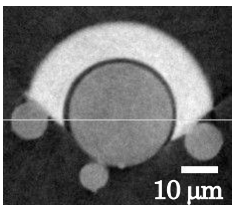


(c) シミュレーション計算でのプロファイル

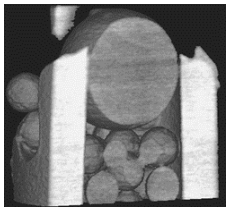
図６　アルミニウムワイヤー（直径 25 μm）の位相再構成プロファイル実験結果とシミュレーション結果の比較。走査は光軸に対して対称に行うので、実際の走査幅はこの倍である。X 線エネルギー5.36 keV。

４．位相トモグラフィーへの応用

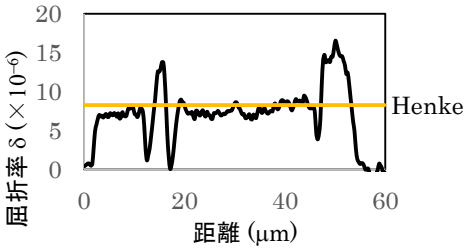
エッジ走査フィルターの走査方向に垂直に試料の回転軸を設定し、360 度にわたって等間隔で 360 投影の微分位相像を記録して CT 再構成を行った。また 10 投影ごとに試料を抜いた像を記録し、その値を投影像から引くことで基準値の補正を行った。CT 再構成計算では、Lam-Rak フィルターを微分像用にしたもの[10]を用いて微分像から FBP 法によって直接再構成計算を行った。このとき、試料の複素屈折率 $n = 1 - \delta + i\beta$ における δ の分布は以下のように求めることが出来る。(14)式で表される $\Delta\phi(x)$ を投影像として用い、再構成プログラムで実際の距離を扱わずにピクセル間隔を 1 として計算した場合、再構成ピクセル値は実際のサンプリングピッチ Δ_x



(a) 再構成断面像



(b) 3D レンダリング像



(c) 断面像の白線に沿った屈折率プロファイル

図７　ガラスキャピラリに詰めたポリスチレン球（直径 30 μm, 直径 10 μm）のエッジ走査フィルターを用いた位相トモグラフィー再構成像。X 線エネルギー5.36 keV。

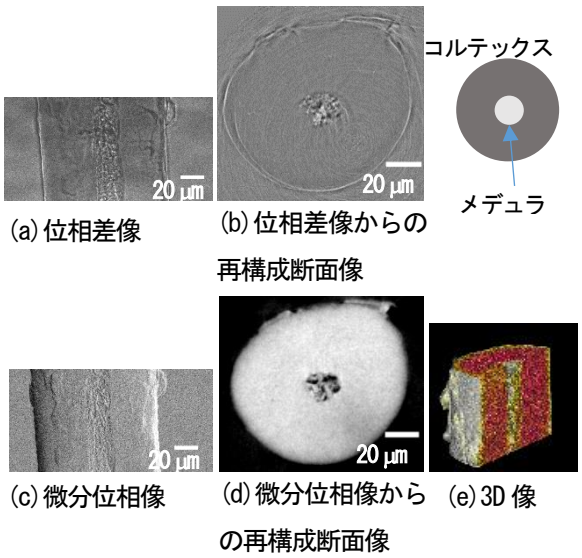
に対する位相変化量 $2\pi\delta\Delta_x/\lambda$ に等しい。実際の計算では、$(I_+(x) - I_-(x))/(I_+(x) + I_-(x))$ を投影データとして再構成計算した結果を R_{ij} として、

$$\delta = S\lambda R_{ij} = \frac{w\lambda}{2r_n dr_n} R_{ij} \qquad (15)$$

を計算して求めた。

図７にこのようにして再構成したポリスチレン球のCT再構成結果を示す。図７(a)の直径30 μmのポリスチレン球中央部50×50 ピクセルのδの平均値は7.39×10^{-6}で、Henkeのテーブルの値8.28×10^{-6}との差は10.8％であり、この領域の画素値の標準偏差は5.4％であった。また、図７(c)のプロファイル中の橙色のラインはHenkeのテーブルの値である。この結果から、CT再構成では比較的均質で定量的な再構成が可能であることがわかる。

図８はヒト毛髪像をZernike型位相差顕微鏡像と比較したものである。位相差顕微鏡では直径6 μmのピンホールを空けた厚さ 3 μm のアルミ箔を図１のように位相板として用いた。また、位相差CT再構成では、通常の吸収CTで対数を計算して吸収係数に変換するところを変換せずに、画素値が直接位相変化に比例すると仮定して計算した。位相差像では微細な構造に高いコントラストが得られるが、比較的均一な内部構造のコントラストが得られない。このため、CT再構成を行うと輪郭のみ強調された像となってコルテックス部分が抜けたようになってしまう。



(a)位相差像　(b)位相差像からの再構成断面像

(c)微分位相像　(d)微分位相像からの再構成断面像　(e)3D像

図８　Zernike 型位相差顕微鏡像とエッジ走査フィルターを用いた微分位相像、およびそれらを用いたCT再構成像。X線エネルギー5.36 keV。

それに対してエッジ走査フィルターを用いた像では、定量的な位相情報が得られるため、CT再構成においては内部まで忠実な再構成が可能となる。もとの顕微鏡像を比較すると、微細な構造を持つメデュラ部分では逆に位相差顕微鏡の方が高いコントラストで観察できている。このような光学系を簡単に切り替えることができることも、本手法の利点である。

本論文では、エッジ走査フィルターという簡単な方法によって、比較的定量的な位相像が得られることを示した。微分位相像ではエッジの微小な位置ずれに起因すると思われる位相勾配を解決する必要があるが、トモグラフィーでは多数の投影像で平均化されるため、かなり均質な再構成像が得られている。今後、生物試料等の高分解能位相コントラスト観察に応用していきたいと考えている。また、本手法ではエッジ走査という方法を用いたが、逆に後焦点面付近である程度広がった集光をするような光源を用いれば走査しなくても同じ効果が得られるのではないかと考えている。そのような光学系は、実験室系のある程度広がったX線源でも実現可能ではないかと検討している。

本研究は、筑波大学名誉教授 青木貞雄博士、及び円谷雄二君、島田晃広君その他多くの研究室大学院生との共同研究によるものである。また、本研究は科研費 基盤研究 (C) (22611003)およびKEK大学等連携支援事業の助成のもと遂行された。

参考文献

[1] Aoki et al., J. X-Ray Sci. Technol. 15 (2007) 65.
[2] N. Watanabe et al., AIP Conf. Proc. 1365 (2011) 313.
[3] K. Nagayama, J. Phys. Soc. Jpn 73 (2004) 2725.
[4] 渡辺紀生, X 線結像光学ニュースレター No.34 (2011) 1.
[5] T. Wilhein et al., Appl. Phys. Lett. 78 (2001) 2082.
[6] C. Chang et al., Opt. Lett. 31 (2006) 1564.
[7] W. Yashiro et al., Phy. Rev. Lett. 103 (2009)

180801.
[8] N. Watanabe et al., J. Phys.: Conf. Ser. 463 (2013) 012011.
[9] http://henke.lbl.gov/optical_constants/
[10] G. W. Faris and R. L. Byers, Appl. Opt. 27 (1988) 5202.

浜松ホトニクスのX線CCDイメージセンサ

浜松ホトニクス(株)固体事業部　鈴木久則

浜松ホトニクスは、長年に渡って、赤外から可視・紫外・真空紫外・軟X線・硬X線までの広い波長域とエネルギー範囲の計測用として、イメージセンサを開発してきました。アプリケーションに応じたイメージセンサを幅広く取り揃え、窓材の変更、フィルタ付き、ファイバーカップリングなど、きめ細かな対応を行っています。特に、微弱光検出には紫外感度が高く、高い S/N、広いダイナミックレンジを持つ裏面入射型 CCD イメージセンサ[1]が適しており、分光分析、半導体検査装置で代表される産業分野やDNA解析で代表されるバイオ分野など幅広い用途で使用されています。一方、表面入射型CCDイメージセンサは、可視・近赤外センサとしてだけではなく、シンチレータ付きFOP(Fiber Optic Plate)をカップリングすることで、高解像度のX線センサとしての用途が拡大しており、歯科用に代表される医療機器や工業用非破壊検査に使用されています[2]。

浜松ホトニクスの最近のトピックスとして、2013年ノーベル物理学賞への貢献があります。ヒッグス粒子を発見した欧州合同原子核研究所(CERN)の大型ハドロン衝突加速器(LHC)実験には、浜松ホトニクスの光電子増倍管や光半導体素子を多数提供しました。開発や製造に携わった者にとって、当社の光検出器が期待通りの性能を発揮したことの証明であり、従業員一同の喜びとなりました[3]。

当社の学術研究用CCDイメージセンサの開発は、大学や研究機関からの要望でスタートしました。1990年代より、X線天文用については、大阪大学・京都大学、光学赤外天文用(すばる望遠鏡用)については、国立天文台と共同開発を行ってきました。1990年代のX線ダイレクト検出CCDイメージセンサの共同開発の結果、Nチャネル表面入射型CCDイメージセンサ(画素サイズ24μm x 24μm、画素数1k x 1k)が完成しました(図1の写真)。空乏層厚50μm、読出ノイズ5e-rms、可視から近赤外をカットするメタルコーティング、-60℃に冷却可能であることが特徴となっています。そして、このCCDイメージセンサは、３つの宇宙観測ミッションに使用されました。月周回衛星「かぐや」の蛍光X線スペクトロメータ、小惑星探査機「はやぶさ」の蛍光X線スペクトロメータ、国際宇宙ステーション「きぼう」の全天X線監視装置(MAXI)のX線CCDスリットカメラ(SSC)です。

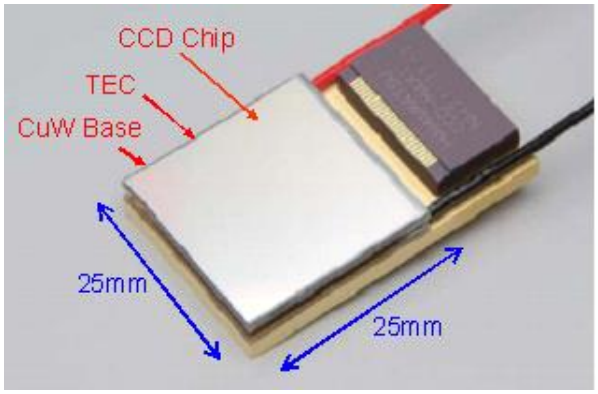


図1　月周回衛星「かぐや」等に搭載されたX線CCD

X線をダイレクトに検出する主要技術について紹介します。CCDはシリコンで作られますが、シリコンでX線をダイレクトに検出する上で最も重要なパラメータは、フォトンの吸収長です。通常のCCDイメージセンサの感度層である空乏層の厚さは数μmです。そのようなCCDイメージセンサでは、数keVのX線を検出することは出来ません。9keVのX線では、約100μmの吸収長になりますので、そのようなX線を高効率で検出するには、空乏層厚が50～100μm以上が必要になります。また、波長1μmの近赤外と9keVのX線では、吸収長が同程度ですので、近

赤外高感度が求められる光学赤外天文と 10keV までの X 線高感度が求められる X 線天文において、CCD に必要とされる空乏層が同じであることを示しています。

1990 年代中頃より、米国のローレンスバークレー国立研究所のグループが、高比抵抗のシリコンを用いて、空乏層厚 200～300μm を持つ P チャネル裏面 CCD イメージセンサの開発に成功しました[4]。P チャネル CCD イメージセンサでは、従来の P 型シリコンウエハ上に作られる N チャネル CCD イメージセンサとは異なり、N 型シリコンウエハが用いられています。同じ比抵抗であれば、不純物濃度の関係から、N 型シリコンウエハの方が空乏層を厚くできます。

ローレンスバークレー国立研究所のグループの成功に刺激され、2002 年より、大阪大学、京都大学、国立天文台、浜松ホトニクスで、完全空乏型の厚い P チャネル裏面入射型 CCD イメージセンサの開発がスタートしました。しかしながら、一般的には高比抵抗のシリコンウエハを使用したイメージセンサは、低比抵抗のシリコンウエハの時と比べて、結晶欠陥に敏感で、開発当初は当社の製造工程にマッチした良いシリコンウエハを入手することが出来ず、大変苦労しました。最終的には、結晶欠陥フリーの大変素晴らしいシリコンウエハを入手出来、開発が加速しました。図 2 に、通常の裏面入射型 CCD イメージセンサと厚い P チャネル裏面入射型 CCD イメージセンサ S10747-0909 の量子効率カーブを示します。S10747-0909 は、近赤外や 10keV 付近の X 線まで、高い量子効率を持つことがわかります。

これまでの開発の成果を活かして、すばる望遠鏡超広視野主焦点カメラ(HSC)用 CCD イメージセンサ(図 3 の写真)を開発しました[5][6]。画素サイズ 15μm x 15μm、画素数 2k x 4k、空乏層厚 200μm、読出ノイズ 5e-rms、-100℃まで冷却し、ダークを<5e-/pixel/hour まで抑えています。HSC は 116 個の CCD イメージセンサを 2 次元的に配置した総画素数 8.7 億画素の天体観測用超大型デジタルカメラです。焦点面の直径は約 50cm にもなります(図 4 の写真)。2013 年 7 月に、M31(アンドロメダ銀河)の全景をシャープかつ一度に撮影した画像を関連の研究機関・メーカーと共同で、プレスリリースしました[7]。HSC の最大の特徴は、その広い視野で、満月 9 個分に相当します。

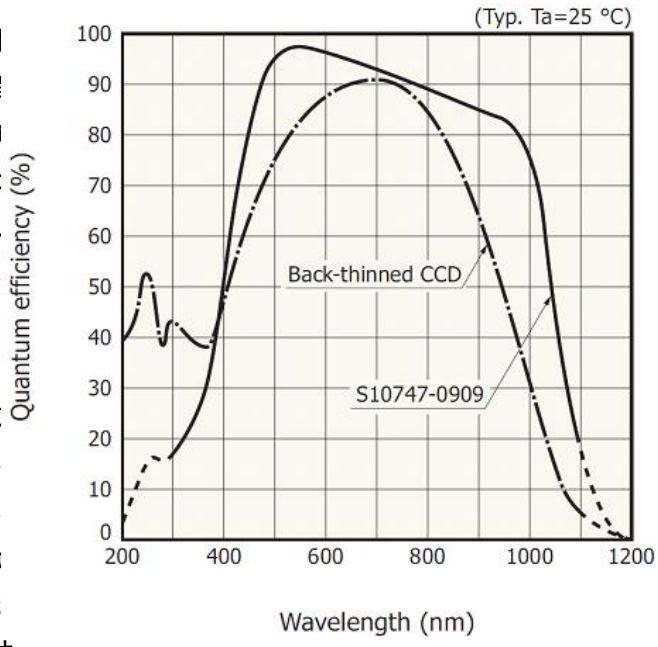


図 2A：紫外～近赤外の量子効率カーブ

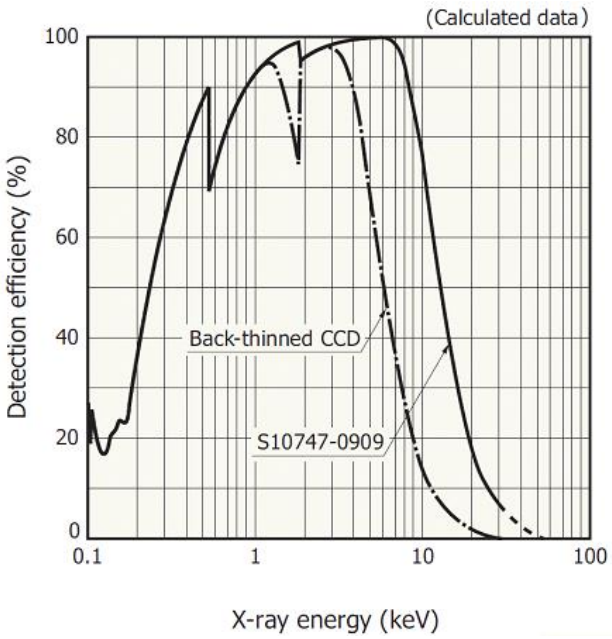


図 2B：軟 X 線の量子効率カーブ

最近、大阪大学、京都大学、JAXA 等と共同で、X 線天文衛星 ASTRO-H の軟 X 線撮像検出器(SXI)用の

CCD イメージセンサ(図 5 の写真)を開発しました。フレームトランスファー型、画素サイズ 24μm x 24μm、画素数 1280 x 1280、空乏層厚 200μm が特徴です。すばる望遠鏡 HSC 用 CCD イメージセンサと基本的に同じ技術を使い、X 線検出用に最適化しています[8]。

大阪大学常深先生のグループからの要望で、SD(シンチレータ・ダイレクト・カップルド)-CCD イメージセンサの開発も行っています[9]。この SD-CCD は 2 つの入射面を持っているのが特徴です。表面入射部はメタルコートされ、裏面入射部は ACS(アモルファス・カーボンプレート・CsI シンチレータ)に結合された反射防止膜がコートされています(図 6)。<10keV の X 線に対しては表面入射部で直接検出し、>10keV の X 線に対しては、CsI シンチレータで発光した可視光を裏面入射部検出することにより、広い範囲の X 線を検出することが可能になります。

以上のように、浜松ホトニクスでは、科学計測・医療・学術用途などに様々なタイプの X 線 CCD イメージセンサを開発しています。

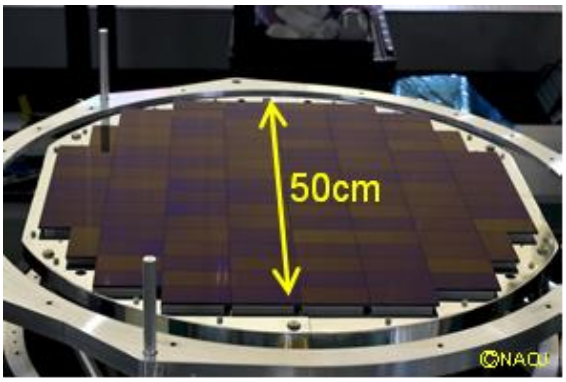


図 4：HSC 焦点面(CCD116 個を搭載)

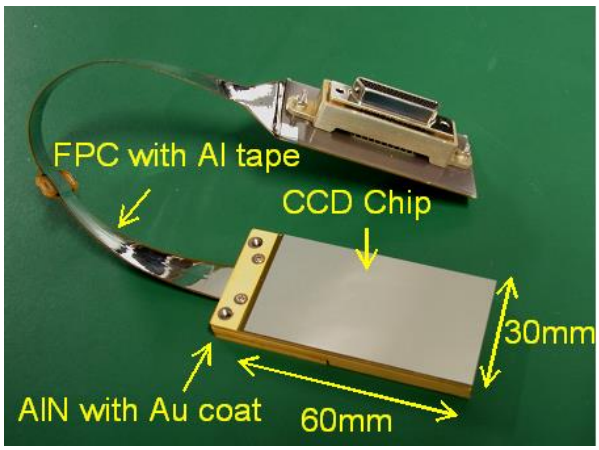


図 5：軟 X 線撮像検出器(SXI)用の CCD

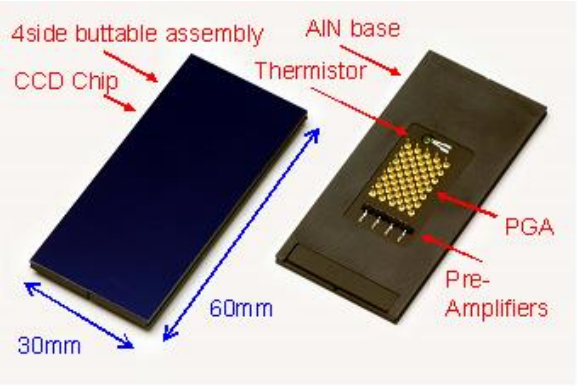


図 3：すばる望遠鏡用 CCD イメージセンサ

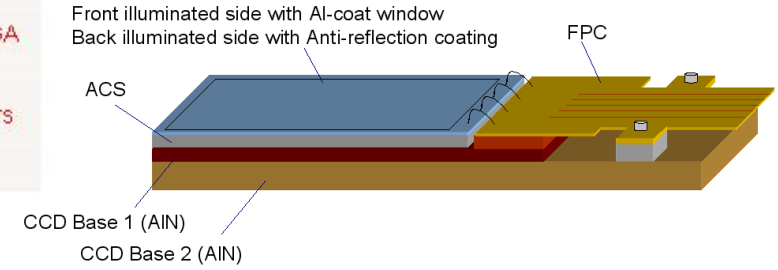


図 6：SD-CCD の断面構造

本稿は、2013 年 11 月 18～20 日に大阪大学中之島センターで開催された第１２回国際 X 線結像光学シンポジウムの講演内容によるものです。

参考文献

[1]M.Muramatsu et al., SPIE Solid State Sensor Arrays 3019 (1997).2

[2]http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/05_handbook.pdf.

[3]http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/news/2013_10_08_2.pdf
[4]S.E.Holland et al., IEDM Technical Digest 911 (1996).
[5]Y.Kamata et al., SPIE High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV 7742 (2010).29
[6]H.Suzuki et al., Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE 6 (2007).4581
[7]http://www.subarutelescope.org/Topics/2013/07/30/j_indeX.html
[8]H.Tsunemi et al., SPIE Solid State Detectors I 8859 (2013).9
[9]H.Tsunemi et al., NIMA,652,(2011).508

第 12 回 X 線結像光学シンポジウムを終えて

現地実行委員長　　常深　博（大阪大学理学部）

X 線結像光学研究の成果発表と一層の発展を図るために第12回目になるX線結像光学シンポジウムが2013 年 11 月 18－20 日の三日間にわたって、大阪大学中之島センターで開催されました。このシンポジウムは第一回が 1990 年に学習院大学で開催されたあと、1999 年に第 5 回が名古屋国際会議場で開催され、それ以降隔年で開催されています。2011 年に東北大で開催された第 11 回シンポジウムの幹事会で常深が実行委員を拝命し、山内（阪大工）、鈴木（SPring8）、齋藤（阪大工）を加えた 4 名の実行委員でそれぞれ分担することになりました。主催は X 線結像光学研究会、後援は、日本物理学会、応用物理学会、日本天文学会、日本放射光学会です。開催にあたっては、文部科学省科学研究費補助金特別推進研究（代表者：常深博）、基盤研究（S）（代表者：山内和人）、独立行政法人科学技術振興機構研究成果展開事業（代表者：國枝秀世）の援助を受けました。

実行委員会では、これまでとちょっと違った趣旨を念頭においたため、国際会議にすること、会期を 3 日間にすることを決めました。初日は交通の便を考えて午後から、最終日は大阪観光を念頭に午前中だけとしました。発表は原則英語としましたが、最終的には英語だけになっています。プログラムは従来を踏襲し、招待講演の口頭発表、ポスター発表と企業展示の三本立てとしました。これらのベースが決まると、幹事の方々による推薦を基本に講演者を決めました。口頭講演は 29 件、それぞれ 20－30 分の講演時間を確保しています。ポスターは当日参加を含め 29 件、A0 ボードを用意しました。企業展示は 6 件で、2m×2m 程度の規格化したコンパートメントを設定しました。こうして蓋を開けたところ、8 名の外国人を含む 119 名の参加となり、盛況であったことが判ります。シンポジウムの内容は、初日は宇宙関係で、望遠鏡や微弱 X 線の検出器が中心です。二日目は XFEL や X 線顕微鏡、三日目は要素技術と言う振分けになりました。それぞれが世界の動向をサーベイし、最新の、そして自慢の成果の紹介です。このあたりの詳細については、シンポジウムの HP（http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp/xio/12thXIO_Sympo/index_final.htm）を参照していただければ幸いです。

会場の中之島センターは、1931 年に大阪帝国大学が設立された中之島の地に、2004 年に作られた 10 階建てのビルです。その最上階の佐治ホールが口頭講演会場、7 階に茶菓サービスを含めたポスター、企業展示会場を準備しました。当初の中之島はやや不便でしたが、2008 年に地下鉄が開通し、交通の便が大幅に改善されています。初日は朝から企業展示やポスター準備でごった返し、午後に備えました。午後のコーヒーブレークには、出来立ての蓬莱の豚マンが到着し、大阪の味を楽しんでいただきました。初日の講演終了後、直ちに佐治ホールの模様替えを行い、ウェルカムパーティー会場になりました。青木特別顧問の挨拶で始まり、飲み物とスナック程度ですが、長時間皆さんの懇談が続きました。

二日目は朝早くから講演を始めました。午後にはポスタービューイングタイムを設け、ポスターや企業展示を見ながらの議論が盛り上がりました。その後、夕食を含めた懇談会に移ります。懇談会は中之島センターのすぐ南にある大阪市立科学館で行いました。その昔、戦前から四ツ橋にあったプラネタリウムのある大阪市立電気科学館がここへ移って来て、今では最新の設備を備えたサイエンスミュージアムになっています。欧米でシンポジウムがあると、そ

のパーティは近くのミュージアムを借り切ることが珍しくありません。しかし、我国ではほとんど聞いたことがないので、ぜひ懇談会を大阪市立科学館で開催したいと思いました。この準備は、半年ほど前から打診を始めています。科学館にとっても初めてのことで時間は掛りましたが、紆余曲折の末ほぼこちらの希望通りのプランで開催できることになりました。科学館の一般公開の終了するのが 17 時ですので、その後で懇談会となりました。懇談会では科学館の加藤館長にもご挨拶をいただき盛り上がりました。さらに、展示場各フロアには科学館の学芸員を配置していただくなど、科学館からも最大限の配慮がありました。館内には実際に操作できる展示も多く、参加者には科学館を満喫していただけたと思います。

最終日も予定通りの進行で、昼過ぎにはすべての講演を終了しています。本シンポジウムでは、各講演のアブストラクトを集めたハンヅアウトを用意し、議論の助けとしました。会期を通して宇宙からＸ線顕微鏡やレーザー関連、それぞれの要素技術など、多くの迫力ある最新研究成果が発表され、講演会場、ポスターボード前、企業展示において熱心な議論が起こりました。

講演会開催にはいろいろな作業が欠かせません。多数の参加者の事前登録や講演予稿のとりまとめ・予稿集作成などでは橘弓子秘書が主体となって担当しました。講演会の運営には、大阪大学の学生を中心としたアルバイトによるサポートが必要でした。彼らは講演会場での進行補助だけでなく、休憩時間中のコーヒーサービスなども担当してくれました。また会場設定やら懇談会の詳細な準備、アルバイト学生を集めての事前指導、当日の会場運営のための詳細なスケジュール作り、受付などシンポジウムのスムーズな進行などについては、橋本正子秘書、澤本茂美秘書の働きによるところが大きかったことを記しておきます。ご協力いただいた関係者にお礼申し上げます。

大阪市立科学館ロビーでのシンポジウム参加者他の集合写真

X線ナノ集光技術研究会 2013「多次元イメージングへの展開」を終えて

高輝度光科学研究センター　　竹内晃久

X線ナノ集光技術研究会 2013 は、昨年 11 月 17 日に大阪大学中之島センターにて開催されました。翌 18～20 日にかけて開催された第 12 回X線結像光学シンポジウムのサテライトミーティングという形での開催でした。同研究会は、2009 年に当時東京大（現東北大）の矢代航氏らを発起人に日本放射光学会の第 1 回若手研究会の企画として開催された事に端を発します。他の研究会との差別化として、3 つの目標、①若手研究者の将来に向けた新しいネットワークの構築、②分野横断的な議論、③学術成果発表よりも寧ろ将来の議論を重視、が掲げられ、以降、隔年で開催されることになり、本会で 3 回目の開催となりました。上記理念を本会議でも引き継いで、若手の活動に焦点を当てて、発表者を全て若手研究者より構成するプログラムとしました。当日は全国各地より、総勢 42 人の自称他称「若手研究者」達が集まりました。今回の開催にあたり、様々な方々からのお力添えを頂きました。特に協賛頂いたX線結像光学研究会には様々なところでサポートをいただきました。特に多大なご助力を頂いた研究会代表の東北大学 柳原美廣先生、シンポジウム世話役の大阪大学 常深博先生、山内和人先生、齋藤彰先生、橘弓子さんには、この場を借りて感謝の意を表したいと思います。開催資金については、関連企業に協賛を募り、浜松ホトニクス株式会社、株式会社インターテック、株式会社ジェイテック、神津精機株式会社、株式会社日本ローパー、NTT アドバンステクノロジ株式会社、以上 6 社（アルファベット順）より多大なご賛同を頂きました。

今回の研究会では、あえて「ナノ集光技術」にとらわれず、テーマも「多次元イメージングへの展開」として、X線イメージングを扱う幅広い分野から講演者を集めました。新たなイメージング法や、従来の手法に新たな分析法を組み合わせたイメージング法の提案、高速型、或いは同期型時分割イメージング、また、それらの産業や宇宙開発への応用例など。勿論、ナノ集光技術関連も複数講演がありました。上に記したように、若手中心である本研究会の特色を出すために、全ての講演者には、講演をお願いするにあたり、また、研究会の冒頭で、「無理に肩肘張らず、臆せずに、寧ろ『この人アタマオカシイ』と思わせればOK くらいでいきましょう」という提案をさせてもらいました。そのような発表が、或いは議論が実際になされたかどうか（良い意味か悪い意味かはともかくとして）は当時の聴講者の皆さんに判断をゆだねますが、参加者の皆さんには、今回の研究会が目指す一つの価値観として、認識してもらえたのではと思います。その甲斐あってか、各発表においては白熱した議論が展開されました。会議の最後の筑波大学 青木貞雄名誉教授による総評では、各講演を先見性、独自性などの項目で評価していただき、集光技術の発展を「ナノ山」を登る登山者のイメージで現在の状況を総括していただきました（この『ナノ山』は第 1 回の時の総括でも出てきて、当時から現在はどの程度の位置なのかを分かりやすく例えてくださっています）。会議の後は有志の皆さんによる懇親会が行われ、こちらもまた多いに盛り上がりました。

次回の会合は 2 年後に東北近辺で開催されます。本会議も 3 回目を無事終えて、いよいよ定期的な運営に向けて軌道に乗り始めてきたかなと感じます。しかしそうすると今度はこの研究会のあり方として新たに考えるべき事、例えば、X線結像光学研究会との棲み分け･差別化（奇しくも両者は今後とも毎回同じ年に開催される事になります）をどうするか、このまま若手中心とすべきか、組織運営はどうするのかなど、多くあります。勿論、今回のようにいつまでもX線結像光学研究会におんぶにだっこの状態

でいるわけにもいきません。諸先輩方のアドバイスを頂きつつ、個人的には、「アタマオカシイ」議論を出席者の誰もが遠慮なくできるような場をこの研究会の一つの理想型として模索していけたらなと思います。

編集部より

【ホームページリニューアルのお知らせ】

本研究会のホームページがリニューアルされました（http://mml.tagen.tohoku.ac.jp/xio）。過去のニューズレターの全記事のタイトルが http://mml.tagen.tohoku.ac.jp/xio/news_letter/NL_article_list.html で閲覧できるようになりました。

【登録メールアドレスの変更などについて】

本ニューズレターは原則メーリングリスト（xio-nl@prec.eng.osaka-u.ac.jp）によるメール配信となっております。メールアドレス変更などの際には、お手数ですが、編集部（xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp）までご連絡ください。メーリングリストは研究会のお知らせなど、会員全員に情報を発信したいときなどにも便利ですので、積極的にご活用ください。

Ｘ線結像光学ニューズレター
No.39（2014年4月）

発行　Ｘ線結像光学研究会
（代表　東北大学　柳原美廣）
編集部　山内和人（大阪大）、齋藤彰（大阪大）、矢代航（東北大）
E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp

『平成26年度Ｘ線結像光学研究会運営組織』

・代表者　：柳原美廣（東北大）
・副代表者：篭島靖（兵庫県立大）
・事務局担当者：豊田光紀（東北大）
・編集局責任者：山内和人（大阪大）
・編集局委員　：齋藤彰（大阪大）、矢代航（東北大）、柳原美廣、篭島靖、豊田光紀
・幹事：

伊藤　敦（東海大）	太田　俊明（立命館大）	篭島　靖（兵庫県立大）
加道　雅孝（原研）	木下　博雄（兵庫県立大）	國枝　秀世（名古屋大）
鈴木　芳生（JASRI）	田原　譲（名古屋大）	常深　博（大阪大）
難波　義治（中部大）	西村　博明（大阪大）	羽多野　忠（東北大）
兵藤　一行（KEK）	牧村　哲也（筑波大）	百生　敦（東北大）
森田　繁（核融合研）	山内　和人（大阪大）	柳原　美廣（東北大）
渡辺　紀生（筑波大）		

・特別顧問：
波岡武（東北大名誉教授）　山下広順（大阪大名誉教授）青木貞雄（筑波大名誉教授）