

## X線結像光学ニューズレター

No. 42 2015 年 11 月発行

極微小部の可視化と定量的識別を可能とするX線2次元検出器

(株)応用科学研究所 副島 啓義

## 1. はじめに

一般的に2次元検出器の分解能は画素サイズで決 まると考えられている。また、X線拡大投影像は、 点光源から発生したX線による対象物の透過拡大像 であり、この拡大像の識別能は光源の大きさとX線 2次元検出器の画素サイズによって決まる、と考え られている。対象物の大きさに対して見かけの画素 サイズを小さくするには、単純には、検出器を対象 物から十分離せばよいが、この場合、非常に多数の 画素数・非常に大きな面積の検出器が必要であり、 また、大気による吸収・散乱等もあるので、現実的 でない。このように、極微小部の識別能をもつ実験 室レベルの[光源-検出器]システムの実現は非常に 困難とされてきた。

画素毎のフォトンカウンティングと画素間の演算 による画素生成法を組み合わせて、サブミクロン~ ナノに相当する画素サイズによる可視化と定量的識 別可能なX線2次元検出器を開発した[1]-[6]。

#### 2. X線の空間分布

試料微小部エッジを通過するX線の空間分布を考 察する。入射X線は吸収や反射・散乱や回折などに より強度が変化したり、方向が変化したりする。図 1 は入射X線が平行の場合の様子である。(a)はエッ ジ近傍で試料エッジに触れずに通過したX線とエッ ジ先端の材質が薄い部分を透過したX線の様子であ るが、他方、(b)に示すように、エッジ先端部のX線 は、エッジによる散乱や回折により、ある広がりを



# 図1 鋭いエッジに入射した平行X線のふるまい。

持つ。したがって、実際に観測されるX線は、(c) のように(a)と(b)が混合した分布を持つことになる。 他の事例として、単純形状における回折線のシミュ レーションを図2に示す[7]。先端角30°の二等辺三 角形が0.1µm間隔で向き合っている形状のスリット に平行光が直角に入射した時の回折線の、スリット から20 cmの位置での強度分布である。入射X線を



図2 狭い間隙で発生した回折X線の分布[7]。

Cu Kα0. 1542 nm、スリット材質を SUS (18-8) として 計算してある。試料から 20 cm の位置において、数 10 μm に渡って回折強度が存在することが分かる。

以上のように、完全な平行光の入射であっても、 あるいは非常に小さい点光源からの入射であっても、 エッジ近傍のX線強度分布には一種の滲みやボケが 生じるのである。つまり、対象物に対して十分小さ い点光源であっても、小さな対象物の非常にシャー プな投影像は得られないのである。しかし、光源の 大きさに関わらず、エッジの形状が僅かに変化した り、エッジの位置が僅かに変化すると、X線の空間 分布も必ず僅かに変化するので、この僅かな変化を 検出することがごきたら、エッジの僅かな変化を検 出することが出来るはずである

3. 検出器の構造と特徴 [1,2]

3-1. 構造と構成

0

検出器の構成を図3に示す[2]。2次元の受光面で X線を電子(光電子)に変換し、電子増幅後に蛍光 面で可視光に変換して、光学レンズにより結合され ている CCD カメラで検出している。大気中で使用す る場合は、光電面を真空環境にするため、Be 窓で封 止してある。

受光面は図4に示すような構造になっている[2]。 入射X線はBe箔を通過後に、Be箔のX線入射とは 反対側面に形成された透過型光電面(例えば金薄膜) で光電子変換される。さらに、この透過型光電面を 透過したX線は反射型光電面(例えばCsI)で光電



図3 検出器受光部周辺の構造[2]。



図4 検出器受光部の構造[2]。

子変換される。Be 箔は、外来ノイズとなる電子やイ オンをトラップし、ノイズの非常に少ないX線検出 を可能としている。本検出器は総合的には 30 µm 画 素相当の検出器である。本検出器は画素毎のフォト ンカウンティングや S/N の面では非常に優れている が、量子効率は良いとは言えない。位置情報は持た ないが、比例性や定量性に優れた比例計数管の量子 効率が 50~80%であるのに対して、本検出器は数% である。

#### 3-2. データ処理と表示の概念 [1]

通常の2次元検出器の概念では、位置分解能は検 出器画素サイズ(図3の場合は30 µm)で決まって しまう。例えば、図1(c)に示されたエッジにおける 分布のように、サブミクロン~ナノの微細領域にお けるX線分布の微細な変化を計測するには、この30 µm は如何にも大きすぎる。そこで、高いS/N値や フォトンカウンティング能力を生かし、画素毎の計 数値と各画素の計数値の相互演算、例えば重心検出 や後述の線形補間法により、極微小部識別能を有す るX線2次元検出システムを開発した[1]。ハード的 な画素と画素の間に、演算により、より小さい画素 生成(仮想画素の作製)を行うものである。X線強 度変化には、緩やかな変化や急激な変化はあるが、 サブミクロン~ナノ領域での不連続な変化はないと 考えられる。何故なら、この領域は数えられる程の 分子数や原子数の集合体の大きさに近づき、他方、 多くの場合、X線の透過・吸収・励起・散乱や回折 が複合して生じる領域であるからである。このこと から、ある極微小領域のX線強度は周囲のX線強度 と概連続的に繋がっている、という考え方が導かれる。線形補間法について図5により記述する[1]。

P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>は既存の画素中心とする。これ ら4つの画素は正方形の4つの角に配置され、間隔 は1(数値の1)とする。また夫々の画素において測 定されたX線フォトン数をC<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>とする。

次に、 $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ に囲まれた位置に画素 $P_5$ を生成する場合について述べる。 $P_5$ の位置を、図 に示したように $P_1$ と $P_3$ を結ぶ線からd<sub>x</sub>、 $P_1$ と $P_2$ を結ぶ線からd<sub>y</sub>とする。このとき、 $P_5$ のフォト ン数 $C_5$ は、 $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ に夫々の $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ からの距離の重みを掛けた値の和となるので、 線形補間法と呼ばれる次式で与えられる。

 $C_5 = (1 - d_y) \times \{(1 - d_x) \times C_1 + d_x \times C_2\}$ 

+ $d_y \times \{(1 - d_x) \times C_s + d_x \times C_4\}$ この $d_x \ge d_y$ に1を整数分割する適当な値を設定 することにより、計算上は任意の位置に画素を生成 し、そのフォトン数が算出される。この結果、図6 に示すように、より精細な表示が得らえる。



図5線形補間法の計算式の記号[1]。



図6 画素生成の概念図。

この画素生成は、必ずしも隣あった画素からの演 算だけではなく、周辺の複数画素間でも演算可能で あり、図7に示した複数画素の重心を用いた演算も 可能である[1]。つまり通常は、画素強度は画素の中 心にその強度が存在するとして扱うが、周辺強度分 布から、重心が求められるので、その重心の位置と 強度から画素生成演算を行うこともできる。



図7 重心検出[1]。

以上の考え方では仮想画素の個数に限度はないこ とになる。ただし、X線フォトン数は、システムが 安定していてもある変動(統計変動)を有するので、 演算の基となる画素のフォトン数が十分大きくない と画素生成には限度がある。十分なフォトン数があ れば、図8に示すように、生成された画素を基にさ らに画素生成を進めることが可能である[1.3]。



図 8 検出器の画素構成と画素生成概念図[1,3]。

#### 4. 微小部識別能の検証

微細な領域の可視化・定量的識別能を判断するに は、実際にサイズの分かっている物体で測定する必 要がある。例えば、サブミクロン~ナノの標準スリ ットで測定できるとよい。とはいっても、このサイ ズのX線用の標準スリットの作製は簡単ではない。 間隔がサブミクロン~ナノで、X線を通さない材質 と厚さのスリットの作製は非常に困難とされ、まし て、可変スリットは、作製されていなかった。図9 と図10は筆者考案のX線可変ナノスリットである [8]。一般的に市販されているゲージブロックは、直 角性・平面性・平滑性が正確・精密に規定されてい る。この特徴に目をつけ、巧妙に組み合すことによ り、ミクロンーナノ可変スリットを安価に実現した。





図10 ミクロン~ナノスリット形状[8]。

また、ゲージブロックの直方体性とゲージ面の一部 を残して、「他の角を切除」することにより、図10 のような様々な形状組合せのスリットを実現した [8]。図示以外にも、〔曲面一曲面〕など多様なスリ ットが可能である。このスリットは、5 nm ステップ で、間隙ゼロ~10 μm 間の任意可変である。



図11 検出器能力検証装置構成。

この可変スリットと本検出器を図 11 のように配 置して、スリットを通過するX線の2次元分布と強 度を測定した。光源は市販の銅ターゲットの点光源 で、光源サイズ 20 µm、加速電圧 30~60KV で、測定 した。

図 12~図 14 に幾つかの検証データを示す。図 12 は µm オーダーの〔平面-平面〕スリットによるX線 強度の変化である。1~5 µm 領域で、ほぼ直線的な 強度変化が計測されている。図 13 は〔微小平面一微





図13 〔微小平面一微小平面〕スリットにおけるX線像と強度変化[3,4]。

図12 (平面-平面)スリットによる強度変化。

小平面〕スリットを通過した×線の2次元画像と、 画像に赤枠で示された制限視野内の×線強度による 検量線である[3,4]。この画像は単なる形状の拡大像 ではなく、間隙の直線的透過×線、紙面奥行方向の 微細凹凸による散乱・回析、スリット出口の回折等 の合計強度の分布像である。制限視野内の合計強度 はほぼ直線的変化を示している。 図14は〔球面一 平面〕スリットである[1]。図13の場合よりデータ 処理における像拡大率が大きい。つまり、測定視野 の生成画素数が多い。図13と同様に、接触部の紙面 奥行方向の形状依存による可視化がされており、制 限視野内の×線強度は直線性を示している。これら のデータが示すように、本検出器はサブミクロン~ ナノ領域の定量的識別が可能である。



図14 〔球面-平面〕 スリットにおけるX線像 とX線強度変化[1]。

5. トライボロジー in-situ 計測への応用[9]-[13] ベアリングでは、金属と金属が潤滑油を介して接 触しながら回転摺動運動をしている。この回転摺動



図15 回転接触部の in-situ 計測[10]。

しているときに、つまり in-situ で潤滑油膜厚を計 測することは、摺動解析や潤滑油解析の重要な課題 の一つである。しかし、両金属が接触したままでの 回転状態での計測は困難であり、さらに、両金属が 相互に高圧で押し付けられ、潤滑油膜厚がサブミク ロン~ナノの領域であると、in-situ 計測は実現し ていなかった。筆者らはX線を用いてこの課題の実 現を図り、有用な測定結果が得られるようになって きている。摺動部は図15に示すように、2個の円盤 が円周部で接触して回転する[10]。一方の円盤の円 周部は平面且つ鏡面である。他方の円盤の円周部は 曲面の鏡面である。両円盤の回転軸は同一面上にあ り、この面上で接触部に圧力を加えることにより、 円盤の捻じれ歪が少なく、圧力と円盤の弾性変形の 関係も単純化が図れる。また、両円盤のこの配置に より、圧力変化や回転速度変化に伴う接触部の空間 位置の移動も最少に抑えられ、X線による精密測定 に適している。この接触部を通過するX線、あるい は接触部で散乱・回折するX線、さらに接触部で発 生するX線を、図16のように回転軸方向から、本検 出器で2次元的に検出して解析を行った[12,13]。両 円盤円周は圧力下で接しており、日常的感覚的では



図16 大円盤と小円盤の円周接触部の観測視野。



図 17 微細間隙を通過するX線、微細間隙で散 乱・回折するX線[11, 12]。

間隙はないのであるが、サブミクロン〜ナノの間隙 であり、潤滑油が薄く存在する。接触部を模式的に 画くと図 17 になるが、間隙を強調して広く示してあ る。

図18はX線2次元全体像で、①中心付近強度と② 中心強度を区別して測定している。 この①と②が 図17の①と②に対応する。圧力と回転速度(すべり 速度)と夫々①②の強度の関係を図19に示す。圧力 が高くなると①も②も強度が小さくなる、つまり間 隙が狭くなり、これは当然である。他方、低荷重の ときに速度が上がっても、②の強度変は認められな いが、①の強度が増して、間隙が広くなっているこ とを示している。これは高速回転することにより、 潤滑油が接触部に多く入り込み、この潤滑油の圧力 により円盤が押し上げられた結果と考えられる。

このことは潤滑油・トライボロジーの分野では知られていることであるが、実際に回転しているときに初めて定量的に観測できた。極微小領域からのX線



図 18 円周接触部の回転軸方向からの観測 [12, 13]。

強度の空間分布を分離分析できた結果である。



図19 圧力・速度とX線強度の関係[13]。

まとめ

本検出器は、あたかも超微細な計数管が2次元に 配置されているかのような機能を有している。他方、 大きさは手のひらに載るくらいであり、いわゆるX 線カメラとしての機能も有している。そこで、比較 的低倍で対象物を投影像として観測し、その上で特 定の部位を順次拡大するとともに、形状の違いを定 量的に解析することができる。特性X線スペクトル や回折スペクトルのメカニカル走査をしない計測、 回折線の2次元空間分布の計測なども可能で、各分 野で広く応用が可能であろうと期待している。

本検出器の開発は浜松ホトニクスの柿原利之氏、 阿井稔晴氏、森邦芳氏、渡辺宏之氏から多くの協力 をいただいて行われた。

#### 参考文献

- [1] 副島啓義、柿原利之:特許 5777875.
- [2] 森 邦芳、稲鶴 務、鈴木 誠: 特許 3007535.
- [3] H. Soejima : ISSS-7, 6PN90, 2014.
- [4] 副島啓義: 第34回表面科学会、8Da09、2014.
- [5] 副島啓義、柿原利之、阿井稔晴、森邦芳、渡辺

宏之:学振141、160回研究会,40-45、および161 回研究会,42-47、2015.
[6] 副島啓義、柿原利之、阿井稔晴、森邦芳、渡辺 宏之:76回応物学会、15a-4E-4および15a-4E-5、2015.
[7] 石田秀信:同氏計算による私信、2007.
[8] 副島啓義:特許5440481.
[9] 副島啓義:特許5664186.
[10] 副島啓義:特許5655531.
[11] 副島啓義、斉藤浩二、海道昌孝:特開2015-031518.
[12] 副島啓義、斉藤浩二、海道昌孝:トライボロジ -2013秋、A15、2013.
[13] 斉藤浩二、海道昌孝、副島啓義:トライボロジ

-2013 秋、A16、2013.

## 宇宙X線望遠鏡の性(さが)

天文学の観測手段の王道は写真である。きれいな 写真は一般の人々(専門家以外の人々)を魅了する。 一般の人々に分かりやすい明快な結果を示すことは、 もっとも重要なことである。ただ、天体物理学の研 究を行う上では、写真だけでは情報量が少ない。そ のため、分光、時間変動、偏光などの情報を用いる。 写真も含め、これらの観測手段では、天体からの信 号の検出感度(シグナルとノイズの比)が重要にな る。つまり、ノイズ信号に埋もれることなく、かつ、 統計的に十分優位と言えるだけの天体からの光(シ グナル)を集める必要がある。でなければ、物理を 議論することはできない。

天体望遠鏡は、写真を撮るためだけの道具ではな い。望遠鏡は光を集光するため、カメラ(検出器) のサイズを小さくすることができる。宇宙では、周 りからの放射線によるノイズ(バックグラウンド) がもっとも大きい。そのため、検出器の小型化、つ まり、放射線を受ける体積を減らすことによって、 望遠鏡を使わない観測に比べ、感度を1,000倍以上 に引き上げることができる。また、検出器を小型化 すれば、検出器だけではまともに光を集めることは できない。そのため、望遠鏡を組み合わせる訳だが、 どれだけ光を集められるかは、望遠鏡で決まる。

望遠鏡の基本性能を示すのは4つ、角度分解能、 有効面積、視野、波長帯域。ここでは、視野と波長 帯域の説明は割愛する。角度分解能は、きれいな写 真を撮る能力だけではなく、有効面積とともに感度 に直結し、どこまで深く宇宙を観測できるかを示す (角度単位で表し、数字が小さい方が優れている)。 また、有効面積は、実効的に光を受け止める面積を 示す(面積の単位で表し、大きい方が優れている)。 角度分解能のいい望遠鏡を作るためには、鏡を磨い

NASA's Goddard Space Flight Center 岡島 崇

て形状のいい望遠鏡を作ればいい(ナノメートルレ ベル程度の精度が必要)。ただし、これにはお金がか かる。本当に莫大な予算がかかる。アメリカ、ヨー ロッパは、天文観測の王道を行くべく、X線望遠鏡 にお金をかけた。そして、アメリカの Chandra 衛星 は0.5 秒角[1]、ヨーロッパの XMM-Newton 衛星は15 秒角[2]を達成している。しかし、望遠鏡開発費用だ けに数百億円、研究時から含めれば、もっと予算が かかっている。なぜ、こんなにお金がかかるのか。 それはひとえに、X線望遠鏡は斜入射光学系だから である(Wolter I光学系、外観はシリンダー状の鏡 [3])。X線は鏡の鏡面に対して表面すれすれに入射 する(鏡面から測る入射角く1度)。そのため、光を 受け止める面積はほとんどない。仮に、直径50セン チ、焦点距離10メートル、シリンダーの全長40セ ンチの鏡を1枚作ったとすると、その面積は20平方 センチ(直径が小さければ、当然この値はもっと小 さくなる)。この鏡で集光する天体からの光は、毎秒 0.06 カウント程度である(約 1 mCrab、2-10 keV)。 予算を費やし、形状精度のいい鏡を1枚(シェル) 作っても、20秒観測してやっと光子1個である。1 日観測しても(観測に使える時間が50%と仮定)た った100個程度である。この計算、比較的明るい天 体を仮定している。これでさらに、分光、時間変動 などの解析をしようと思ったら、まったく統計が足 りない。そこで、X線望遠鏡では、鏡を何枚も作り、 同心円状に並べるのが一般的である。Chandra は直 径1メートルまでの鏡を4シェル。XMM-Newton は直 径 70 センチまで 58 シェル (表1参照)。ここで分 かるように、Chandra は角度分解能がいいものの、 有効面積はそれほど大きくない(波長による)。この ように、角度分解能をあげるには、サイズが大きく、

衛星名	Chandra	XMM-Newton	ASTRO-H
口径	120 cm	70 cm	45 cm
焦点距離	10 m	7.5 m	5.6 m
基板厚	2—3 cm	2—3 mm	0.15 - 0.3 mm
シェル数	4	58	203
有効面積 (@6 keV)	300 cm <sup>2</sup>	940 cm <sup>2</sup>	420 cm <sup>2</sup>
角度分解能	0.5秒角	15 秒角	72 秒角
重量	950 kg	440 kg	36 kg
費用	数百億円	数百億円	数億円

表1 望遠鏡諸元比較(費用は目安)

形状精度の良い鏡を複数必要とするため、予算が大 きくなる。実際、Chandraの鏡は0.5秒角を達成す るほどだが、予算超過のため、もともと6シェルの 予定を諦めて4シェルに減らした。現在のところ、 XMM-Newton は世界最大の有効面積を誇るが、それで も1,000平方センチ程度である。それは、実に14 インチの光学望遠鏡と同じサイズである。つまり、X 線天文学の業界では、数百億から数千億の予算を使 って人工衛星をあげているにも関わらず、そこに搭 載されている望遠鏡は、有効面積という意味で、ネ ット通販で購入できるちょっと高めの望遠鏡を使っ ているのである。これが、宇宙X線望遠鏡の現状で ある。

望遠鏡の性能は、どういった天体物理学をやりた いかで決めることになる。とは言うものの、人々は すでに0.5秒角のChandraの写真を見てしまったし、 XMM-Newtonよりももっとたくさん光を集めたい、そ う思うのが普通である。世界の、特にアメリカ、ヨ ーロッパのX線望遠鏡の開発研究者は、Chandra 程 度の角度分解能、XMM-Newtonよりもさらに大きな有 効面積を目指し、研究を続けてきた。有効面積を大 きくするには、とにかくシェル基板の厚みを薄くす る必要がある。斜入射光学系では、分厚い基板は多 くの光を止めるからである。そのため、Chandra の 用な基板を直接研磨する方法ではなく、XMM-Newton のように母型を用意、それを研磨し、その形状を薄 いシェル基板にレプリカする方法[4]が主流であっ た。Chandra の基板厚は数センチ、XMM-Newton は数

ミリ、それを数百ミクロンまで薄くするのが目標だ。 そして、有効面積を大きく、少なくとも天文学者が 欲しがるだけ大きくするためには、数百シェルを製 作し、同心円状に並べる必要がある。しかし、当然 莫大な予算がかかる。当初、安く精度のいい母型を 作ることが第一目標であったが、それも難しく、と にかく莫大な予算がかかる。アポロや Chandra を作 っていた時代はとっくに終わった。世界の景気が低 迷している今、宇宙開発、宇宙科学にそうそうお金 を出してはくれない。さらに、母型の製作には時間 がかかる。サイズにもよるが、数ヶ月から半年かか る。仮に200シェル分の母型が必要だとして、年間 10個作れたとして 20年かかる。これでは、X線天文 学者達は生きていけない。新しいデータをみる前に、 職を失うか退職するかだ。また、テクニカルには、 数百ミクロンの厚みで、直径の大きなシェルをどう 保持するか、という問題も残る。こうして最近では、 母型を使わない、さらに、完全なシェルではなく、 いくつかに分割したセグメント方式の研究が主流に なっている。セグメントごとにモジュールを作り、 それを組み合わせて完全な望遠鏡にする。ヨーロパ のいくつかのグループでは、Athena などの将来衛星 のために、Silicon Pore Optics という望遠鏡の開 発が進んでいる[5]。これは、シリコン基板を曲げ、 それを内側のシェルに対応する基板の背中に置いた リブ(約1ミリピッチ、約0.17ミリ幅)に押しつ け固着する。数十枚のシリコンを積み重ね、100x100 ミリ程度のモジュールにして、それを多数敷き詰め

ることで望遠鏡にする。X線の入り口からみると細 孔状(pore)に見えるので、Pore Optics と呼ばれる。 ただ、基板を曲げる必要があるため、半径の小さい シェルに対応するモジュールを作るのは難しい。ま た、アメリカでは、分厚いままのシリコンのクリス タルを研磨し、Wolter I 型(放物面、もしくは、双 曲面)の形状を作り、その後クリスタルをスライス して、薄い基板にするという方法の研究が始まって いる[6]。この方法でも、モジュールを製作して望遠 鏡の形に組み上げる。研磨をしているものの、1-2 日で一枚の基板を作ることができる。いずれの方法 でも、モジュール、もしくは、それよりも小さなテ スト品で、現在のところ数秒角から15秒角程度の角 度分解能が達成されている。しかし、最終的には何 千枚ものセグメント基板を組み合わせることになり、 完成品でも同程度の角度分解能が達成できるかは、 今後の課題だろう。

前述したように、どんな望遠鏡性能が欲しいかは 天体物理学の目的による。また、角度分解能のいい 望遠鏡は高い。望遠鏡だけでなく、衛星の姿勢制御 の精度もあげる必要がある。そこで、角度分解能を 諦める、というのも1つの手だ。実際、日本のX線 天文衛星では、角度分解能を犠牲にすることで望遠 鏡にはお金をかけず、分光観測に重点を置き、これ まで数々の衛星を打ち上げ、X 線天文学をリードし てきた。世界で初めてX線CCDカメラを搭載したの は「あすか」だし[7]、波長分解能を数十倍も向上す るX線カロリメータを搭載するのも、2016年打ち上 げ予定の日本の ASTRO-H だ[8]。この目的には、と にかく安くて、少しでも多くの光を集める望遠鏡が 最適だ。さらに、ロケットで宇宙に打ち上げるため、 極力軽い必要がある。Chandra の望遠鏡は 1,300 kg、 XMM-Newton は 400 kg。こんな重い望遠鏡を日本の ロケットで打ち上げるのは厳しい。安くて、軽くて、 大面積。そんなファーストフードのスローガンのよ うな X 線望遠鏡があるのか?実はある。NASA's Goddard Space Flight Center *σ* Peter Serlemitsos 博士が開発した、アルミ基板を用いた多重薄板型望 遠鏡である[9]。Serlemitsos 博士は、1980 年くら

いから望遠鏡の開発続けているが、当時から研磨母 型は使わず、セグメント基板を使用する方法で開発 を続けてきた。ついに時代が博士に追いついたので ある。熱成形により150ミクロン程度のアルミ基板 を成型して円錐(の一部)形にする(Wolter Iの円 錐近似)。また、安価なガラスチューブの表面が、実 はX線を反射できるほど平滑(数オングストローム) であることを利用し、金を蒸着しエポキシ接着剤を 介して、その平滑面をアルミ基板の表面にレプリカ する。この方法で、たった数億円程度で X 線望遠鏡 を作り上げた。最新の ASTRO-H の望遠鏡[10]では、 口径45センチの内側に約200シェルが同心円状に 並べられていて、重量たった35kg(図1)。それで も Chandra をしのぎ、XMM-Newton に迫る大有効面 積を達成している(表1参照)。しかしながら、市販 のガラスチューブは形状が悪く、平滑面だけでなく、 形状までレプリカしてしまい、角度分解能はよくな かった。それでも、「あすか」(約4分角)、「すざく」 (約2分角) [11]、ASTRO-H (約1分角) と、ミッ ションごとに角度分解能を倍向上してきた。最近の 研究では、エポキシ接着剤をさらに薄くすることが でき (< 10 ミクロン)、これによりガラスチューブ の形状に依存しない基板の製作が可能になってきた。



さらに、円錐近似アルミ基板を用いていたが、Wolter

図 1 ASTRO-H の軟 X 線望遠鏡(Soft X-ray Telescope, SXT)。シェル基板は4つにセグメン ト化され、プライマリとセカンダリそれぞれ 203 シェル、合計 1624 枚の基板が使われている。基 板の厚みは 0.15-0.3 ミリ。

 I (放物面、もしくは、双曲面)の形状に成型する ことも可能になった。数十ペア基板を用いた最近の テスト実験では、角度分解能 38 秒角を達成、順調に 性能をあげている。また、この技術を使った X 線集 光系(1回反射の放物面鏡)が NASA の NICER (Nutron star Interior Composition ExploreR、2016 年に国際宇宙ステーションに搭載される[12])で使 われている。口径 10 センチ、焦点距離 1 メートルの 小さな集光系を 56 個並べ、約 2,000 平方センチの 有効面積(1keV)を実現(図2)。各集光系はたった 0.3 kg である。



図 2 NICER X 線集光系 (X-ray Concentrator, XRC)。各集光系は口径 10 センチ、焦点距離 1 メ ートルで、重さはわずか 0.3 kg。56 個の有効面 積の合計は 2,000 平方センチを超える(1 keV)。

Serlemitsos 博士のアルミ多重薄板型望遠鏡は、 ASTRO-H も含めると、すでに13 台も宇宙に行き活躍 している。もっともフライト経験の多い望遠鏡であ る。しかし、数秒角の高角度分解能、大有効面積が 望まれる世の中、次第に見向きもされなくなってき ているのが現状である。実際、本当に数秒角、大有 効面積の望遠鏡が数十億円程度で作れるのなら、 Serlermitsos 博士の望遠鏡にもう出番はないだろ う。ただ、最近の衛星プロジェクトでは、装置の成 熟度(TRL, Technology Readiness Level)が必ず問 われる。現時点で確実にフライト品を作れる技術と いえば、世界で彼の望遠鏡だけだと思う。1分角程 度、またはそれ以下の分解能を許せば、数千平方セ ンチの大有効面積に最も近い技術は、彼の望遠鏡に 間違いない。また、お金のないプロジェクト、望遠 鏡にお金をかけたくないプロジェクト、さらに、ロ ケット実験や気球実験と言った低予算の実験には、 彼の望遠鏡がベストだ。アルミ多重薄板型望遠鏡は まだまだ行ける。このように、30年前に、現在でも これからでも通用する技術を考えた Serlemitsos 博士にはただただ脱帽する。Serlemitsos 博士は、 彼の望遠鏡でもっときれいな写真を撮りたいと思っ ているだろう。

話は変わるが、今年、2015年6月5日に、X線決 像光学の学会を始めた山下広順先生が亡くなられた。 私の学位論文の指導教官でもある。私はとても幸運 で、山下先生がまだ学生と一緒に実験をしていた時 代の最後の学生だろう。その後、先生は学科長、学 部長、大学副総長となり実験室にはいられなくなっ てしまった。先生は怖かった。しかし、先生との実 験は本当に楽しかった。物理実験とは何か、という のを教えられた。また、先生は「常にスペース実験 を意識して実験しろ」とおっしゃっていた。つまり、 やり直しはできない、ということだ。当時は、そん なこと言われても、と思っていたが、先生と行った 日頃の実験、放射光での短期間実験、気球実験、す べてを通してスペース実験とは何かを叩き込まれた。 今振り返ると本当に大切なことだと実感できる。山 下先生のもとで指導され、その後 Serlemitsos 博士 のもとで仕事をしている私は本当に幸運だと思う。

## 山下先生のご冥福を心からお祈りしたい。

#### 参考文献

- [1] M. C. Weisskopf et al., PASP 114 (2002) 1.
- [2] F. Jansen et al., A&A 365 (2001) L1.
- [3] H. Wolter, Ann. Physik 445 (1952) 94.
- [4] D. H. Lumb, Opt. Eng. 51 (2012) 1.
- [5] M. J. Collon, Proc of SPIE 9144 (2014) 91442G.

[6] W. W. Zhang et al., Proc of SPIE 9144 (2014) 914415.

[7] Y. Tanaka et al., PASJ 46 (1994) L37.

[8] T. Takahashi et al., Proc of SPIE 9144 (2014)

## 914425.

[9] P. Serlemitsos & Y. Soong, Ap&SS 239 (1996) 177.

[10] Y. Soong et al., Proc of SPIE 9144 (2014) 9144

[11] K. Mitsuda et al., PASJ 59 (2007) 1.

[12] Z. Arzoumanian et al., Proc of SPIE 9144 (2014) 914420.

## 会議報告「X-ray and Neutron Phase Imaging with Grating 2015」

東北大学多元物質科学研究所

高野秀和

この度、9月8日~11日の日程で開催された、国際ワークショップX-ray and Neutron Phase Imaging with Grating 2015 (XNPIG2015) へ参加さ せていただいた。筆者はこれまでX線イメージング 関係でそこそこやってきた身ではあるが、回折格子 干渉計については新人みたいなものであり、不勉強 な視点もある報告となることをご容赦いただきた い。

位相イメージング(位相変化量を定量して可視化 すること)のアドバンテージについては、本報告を 読まれる諸氏においては言わずもがなであるが、回 折格子を利用した位相イメージングは、平行光だけ でなく発散光においても可能であること、照明光の 空間コヒーレンス度や単色度に対する要求が緩い ことが大きな特徴である。自己像を生成させる位相 格子、モアレ干渉縞を生成するアナライザー格子

(吸収格子)が標準的な Talbot 干渉計の構成であ るが、光源の空間コヒーレンス度を向上するための スリット光源(ソース格子)を用いる Talbot-Lau 光学系の導入により、インコヒーレントな実験室光 源でも干渉計測が可能となり、広範な応用が進めら れている。

本ワークショップはその名の通り、回折格子を利 用した位相イメージングに特化した会議として立 ち上げられ、2012年3月に東京にて第1回が開催 された。今回は2014年1月に行われた第2回に続 く第3回目であり、SPIEおよびNIH (National Institute of Health)主催での開催となった。会場 のNIH は米国で最も歴史のある医療研究機関であ り、米国メリーランド州ベセスダ郊外に位置する。 ワシントンDC からメトロでアクセス可能であり、 駅が正面と非常に便の良い立地であるが、入構のた めのセキュリティーチェックが厳しく、特に朝の混 雑のためゲートから会場のNatcher Conference Center へ移動するまで30分以上要した日もあった。

John F. Clauser 氏による Talbot 干渉計の歴史 的背景についての詳細かつ丁寧な講義よりスター トしたロ頭講演は54件(うち招待講演14件)がシ ングルセッションで行われ、2日目の夕方にポスタ ーセッション(26件)が行われた。参加者数は、 Secretaryの方にお伺いしたところ113名であり、 主に、開催地である NIHの Han Wen 氏、独ミュンへ ン大の Franz Pfeiffer 氏、スイス ETHの Marco Stampanoni 氏、東北大の百生 敦 氏の各グループ が中核となっていた。

今回の発表トピックスについて大別すると、光学 系や測定法の装置技術、画像解析法など、手法に関 する研究、要素技術として極めて重要である回折格 子作製に関する研究、そして、応用研究であった。 以下ではそれぞれのトピックスについて、発表の概 要を紹介する。

・手法に関する研究

新規光学系においては、Han Wen 氏らの開発した PFI (Polychromatic Far-field Imaging) 法が目を 引いた。狭小ピッチの位相格子を3枚利用してマッ ハツェンダー型干渉計として機能させる。高感度で ある結晶干渉計と白色発散光で利用できる従来の 回折格子干渉計の良い特徴をうまく合わせた光学 系であり、従来の回折格子干渉計に比べて非常に高 い位相検出感度の達成が報告された。また、

Alessandro Olivo 氏らのグループが開発している Edge Illumination 法に関する講演も多かった。マ ルチスリットで試料を照射し、検出器前に置いた Coded aperture を移動することで位相計測を行う。 干渉計測とは異なり、原理的には集光 X 線を用いた 走査型微分位相顕微鏡のマルチビーム版と言える が、本質的には回折格子干渉計と同等であろう。 従来の回折格子干渉計においても、測定法や解析 法の発展に関する報告があった。通常の位相計測で は多数の測定を要する稿走査法を用いるのが一般 的であるが、2点の測定で計測可能な Reverse Projection 法や、稿走査無しの CT 測定から計測を 行う Sliding Window Acquisition 法を発展させた 手法が報告された。また、より少ない情報量(少投 影数、少露光量)から高画質を得るため、繰り返し 計算や先見情報を利用した画像再構成アルゴリズ ムに関する報告もいくつか見られた。

大阪大のグループからは、X線ターゲットにソー ス格子を埋め込む X線源とその応用についての報 告があった。高倍率拡大投影光学系と組み合わせ、 拡大した自己像をフーリエ変換法で解析すること でアナライザー格子を使用せず縞走査も必要とし ない測定法を展開している。

画像解析法においてはDark-field コントラスト に関する発表が多く見られた。干渉縞の鮮明度変化 を可視化するものであり、試料でのµrad 程度の散 乱に敏感であるため小角散乱コントラストとも呼 ばれる。解像度以下の微細構造分布が得られるため、 様々なアプリケーションで有用な可視化手法とし て浸透していると感じた。さらに、微細構造の3次 元分布に配向情報を付与する Tensor tomography の報告もあり、構造解析のツールとしての応用拡大 が見込まれる。

#### ・回折格子作製に関する研究

回折格子干渉計においては回折格子の作製技術 が極めて重要である。位相感度を向上するためには 格子の狭ピッチ化が望まれ、視野の拡大には大面積 化も要求される。さらに、ソース格子やアナライザ 一格子には吸収格子が必要であり、高エネルギーX 線においては高アスペクト比格子が要求される。

独 KIT 社は、LIGA 技術をベースとした技術開発 を進めており、Bridge 構造(サポート付きの鋳型 のネガ構造)において高さ 200 µm、ピッチ 4.8 µm の金格子の作製に成功している。また、多重露光技 術によりクロスリンクサポート構造を持たせた Sunray 構造も開発しており、高さ 130 µm (同ピッ チ) であるが、Bridge 構造に比べて剛性が高く均 ーな格子が得られている。

Si プロセスである DRIE (Deep Reactive Ion Etching) 法を利用した作製法の報告が数件あり、 汎用的な技術として浸透していると感じた。なかで も、Han Wen 氏のグループでは、前述の PFI に使用 するための狭小ピッチ回折格子を開発しており、ナ ノインプリント+クライオ DRIE で 200 nm ピッチの シリコン構造を作製し、ALD (Atomic Layer Deposition)で形成したシード層を利用したメッキ により、アスペクト比 40 の金格子を作製している。

ゾーンプレート作製技術としても利用されてき た MACE (Metal Assisted Chemical Etching) 法を 用いた回折格子作製についての報告もあった。金薄 膜の縞状構造を利用したエッチング方向制御をし ており、高速な大面積プロセスとして今後の期待が 大きい作製法である。

大面積化においては、4 インチプロセスが主流と なり100 mm角の格子作製が可能となってきたが、 医学診断応用としては、例えばマンモグラフィでは 30 cmの視野が要求されており、更なる開発が望ま れる。

・アプリケーション

アプリケーションにおいては、汎用ベースX線源 を用いたTalbot-Lau 干渉計を利用したものが主流 であり、特に、医学診断への応用を見据えた報告が 多かった。コニカミノルタ社が開発した手指や膝の 軟骨観察に特化した装置はほぼ実用段階に入って おり、一般が利用できる日もそう遠くないと感じた。 マンモグラフィへの応用を見据えた報告も数件あ り、関心の高さが窺えた。その他、肺組織(細気管 支)の観察等による肺疾患や、心臓疾患への応用に 関する報告がされた。これら医学応用のトレンドも あり、試料のドーズ量低減に関する議論も多く、mGy 以下での高画質計測というのが大きな目標である と感じた。

工業応用については、APS のグループから 80 ps のシングルバンチを利用した超高速イメージング や、フーリエ変換法を用いた 2.4 kHz の高速位相イ メージングに関する報告があった。材料においても、 ファイバー複合材料、電池等のほか、X線屈折レン ズの欠陥検査に利用した報告もあった。

また、ライン検査用スキャナー等、産業用非破壊 検査に特化した装置開発の報告もいくつか見られ、 産業応用への機運が感じられた。



会場の NIH Natcher Conference Center。

中性子は本ワークショップの名称にも含まれて おり、回折格子干渉計応用の大きな目玉である。 Talbot-Lau 干渉計により磁区構造からの散乱を Dark-field で可視化する利用が多くみられ、磁性 材料を中心に応用が拡がっていくであろう。中性子 用の格子には相互作用が圧倒的に大きいGdが利用 される。Si 格子への斜め蒸着によって作製される ほか、GadOx 粉末を埋込む格子作製法についての報 告もあった。

回折格子干渉計は、これまで放射光光源等の高輝 度光源でしか成しえなかった位相計測を一般的な X線源に拡張できたことで、急速に応用が進んでい る。従来の吸収ベースの装置に対して付加的な構成 で実現可能であるため、現在普及している医療診断 装置や非破壊検査装置における応用意識が高いの は当然のことであろう。本ワークショップでも、そ のような流れが強く感じ取れ、確実に実用に近づい ている印象を受けた一方、空間分解能や時間分解能 に特化した話題が少ない点が筆者には物足りなく 感じた。

なお、本ワークショップではポスター賞が設けら れており、3名の方が受賞の栄誉に輝いたが、Best ポスター賞には日本から、ソース格子に替わる La 埋め込みターゲットを開発した山崎 周 氏が選出 された。

3日目の午後は、Excursion でスミソニアン国立 航空宇宙博物館のUdver-Hazy Center へ訪問した。 ここは、ダレス空港近くにある"別館"でありワシ ントンDC にある本館より規模が大きい。スペース シャトルディスカバリーやエノラゲイの実機展示 は圧巻であった。

会期中は総じて天候に恵まれ(1日寒い日があっ たが)9月上旬とはいえ日中は30度を超す暑さで あった。しかしながら、米国の屋内は必ずと言って よい程冷房が効きすぎており、今回もそれを見越し た防寒措置を講じたつもりではあるが、それも通じ ないほどのすさまじい冷房に閉口した。休憩時間の コーヒーを屋外ですすって暖を取らないと凍えて しまうほどであった。また、ポスターセッションは おろか、Welcome reception までアルコール類がビ ールすら出てこないのは大変な衝撃であっ た。"Health"を冠する NIH なので、なるほどと いう感じではあるが、米国らしい極端な対応を感じ た。とはいえ、外に出ればアルコールはそこら中に あったので個人的には全く問題なかった。

次回は Zurich の ETH で 2 年後の開催となる。か つて X 線顕微鏡国際会議 (XRM2008) が開催された 場所であり、物価の高さと寒さの中つついたチーズ フォンデュが思い起こされる。次回はぜひ発表者と して、このような会議報告で紹介して頂けるような インパクトのある成果を出せるよう、研究に勤しん でいきたい。

## 会議報告「SPIE OPTICS+PHOTONICS 2015 を振り返って:

## 次世代宇宙 X 線光学系の躍進」

名古屋大学理学研究科

田原 譲、三石 郁之

本稿では、今夏アメリカカリフォルニア州サンデ ィエゴの中心部に位置するサンディエゴ国際会議場 にて開催された、SPIE OPTICS+PHOTONICS 2015 につ いての会議報告を行う。本会議は毎年同会場にて行 われる光科学・技術系世界最大規模の国際会議であ り、本年も 4,400 人の参加者と 180 社もの企業が 展示会場に立ち並んだ。そのため、本稿にてその内 容全てを網羅することは到底不可能であり、特に筆 者らが参加した「光工学と応用」部門の中の「極端 紫外・X 線・ガンマ線光学系 (天文学 VII)」 セッシ ョンにフォーカスを当て紹介していく。本セッショ ンは8月10-13日の計4日間にわたり開催され、 チェレンコフ望遠鏡・ラウエレンズ・X 線望遠鏡・ 回折格子・偏光光学素子やシミュレーションを含む 設計や評価システム、成膜技術などの周辺技術まで、 多岐にわたる計 15 もの分科会からなる。

筆者らは将来衛星搭載を目指した 4 回反射型字 宙 X 線光学系の設計および開発の現状について口 頭発表を行った。本光学系は、この分野で多用され ている Wolter I 型とは異なり、1 枚の回転放物面 と3 枚の回転双曲面を組み合わせた拡張型 Wolter I型光学系となる。反射回数が多くなるため反射率 が低下する一方、入射角を小さくすることができ、 大口径化が可能となる。本発表では、6 m の焦点距 離を仮定することで観測意義の高い鉄 K 輝線群付 近にて、> 3,000 cm<sup>2</sup> もの大有効面積を原理的に達 成することができることを示した。これは従来衛星 を遥かに凌ぎ、1,000 億規模の大型将来衛星を上回 る値となることも強調しておく。現在要素技術の開 発に取り組んでおり、デモンストレーションモデル の製作および X 線評価までを終え、結像性能の改善 が課題となっているものの、有効面積は期待通りの 値を得ることに成功した。今後は反射鏡の固定方法 や製作工程の見直しを行い、結像性能の改善に努め る。

さて、その他の発表に目をやると、まず筆者らが 勢い良く筆を運ばせるのは、近年特に目覚ましく開 発が進められているシリコン・ガラスなどを基板材 質として用いる、いわゆる次世代宇宙 X 線光学系に ついてである。宇宙 X 線光学系には衛星等非常に限 られたリソースの中で、より効率的に高い結像性能 と集光力の実現が求められる。前者の達成には鏡面 の2次曲面化もしくは高精度での近似が、後者には 軽量性が不可欠となる。ところが鏡面精度を上げる には基板剛性の向上が必要であり、これが基板厚の 増加、つまりは重量増加をまねく。そのため両者の 両立には工学的なジレンマをはらむことが知られて いる。このジレンマの改善に向け新たに提案された のが次世代宇宙 X 線光学系であり、ここでは最も注 目されているシリコン光学系について簡単に紹介し ていくことにする。単結晶シリコンはガラスと比較 しても 100 倍以上熱伝導が良く (~150 W/m・K)、剛 性(~100-200 GPa) や熱膨張係数(~3 µm/K) も 2 倍程度優れるため、形状保持の観点から筋が良い。 またシリコンは半導体基材としても確固たる地位を 築いているだけに、兆を凌駕する半導体市場の恩恵 を受け、低コスト化や大量生産、周辺技術の応用と 潜在的魅力も含む。さて、現在ではジレンマの改善 を狙い、ダイシングによりリブ状に切り出したシリ コンを精度良く重ねる高精度アラインメント法 (e.g., [1])、および >10 mm 厚のシリコンブロック 上に鏡面を形成し、その後切り出すシリコンブロッ ク高精度鏡面切り出し法(e.g., [2, 3])の研究開 発が精力的に進められている。どちらも素材となる

シリコンの特長を存分に活かし、例えば前者では直 径 300 mm 基板に対し、厚さ一様性として基板全面 で TTV < 300 nm (PV 値), 基板中心部ではばらつき の典型値として ~30 nm. マイクロラフネス <1 Å を達成している。これらのシリコン基板は最終的に は数 10 枚程度精度良く重ねられる。驚嘆すべきは、 ダスト混入によるアラインメント精度の劣化防止の ため、組立作業はクラス 100 クリーンルーム内での ロボット作業として全自動化されている点であり、 その徹底ぶりをうかがうことができる。またシリコ ンブロック高精度鏡面切り出し法では、50 mm 厚の シリコンブロックをワイヤー放電加工などにより1 mm 程度に切り出し、鏡面裏側の切り出し面を HNA エッチングすることで応力を緩和し、切り出し前後 での鏡面形状が数 nm レベルで一致していることが すでに実証されていることも特筆すべきことである (図参照)。これら光学系の研究開発は、2028 年打ち 上げ予定のヨーロッパ主導大型 X 線国際天文衛星 計画 Athena 搭載に向け、今後も熾烈な競争が繰り 広げられていくことが予想される。



本セッションではその他にも、小型(5mx14m 程 度)ながら広がった X 線源(60mm x 200mm)かつ 高い平行度(HEW 1.5 秒角)を実現する X 線発生 器の開発や、大口径一周および分割式光学系用アラ インメントモジュールの開発、Geant4 ベースで熱機 械的応力の効果等を考慮した光線追跡シミュレータ の開発等、次世代 X 線光学系を軸とした周辺技術の 発表も相次ぎ報告されていた。また、反射鏡製作後 のポストプロセスにも熱い視線が注がれていた。例

えば反射鏡表面にイオン注入を施すことで応力を発 生・制御する反射鏡形状の補正法や、数 µm 厚のピ エゾフィルムを反射鏡裏面に膜付けすることによる 形状制御法、さらにはスパッタ成膜を局所的に行う ことによる面粗度の改善法等、高性能光学系の実現 に向けポストプロセスの高精度化も進んでいる。例 えば局所スパッタ成膜法では、数ミリスケールのス リットを用いてはいるものの、すでに二次元の面補 正にも成功しており、数秒角スケールの振幅補正に も成功している。その他にも新規技術として、磁歪 を用いた変形工程も紹介されていた。4µm 厚の超磁 歪合金として知られる Terfenol-D を基板裏側に成 膜し、200 µm 厚のガラス基板のサブミクロンの変形 の実証に成功していた [4]。シミュレーションとも 8.8 x 6.6 mm スケールでは < 20 nm レベルで再現 性が確認されており、変形領域の拡大および任意の 曲面への形状制御等、課題はあるものの、新たなア クティブ光学系として今後の発展に注目していきた い。こうしたポストプロセスの高精度化の波は、着 実に近付いてはいるものの、いまだ遥か先次世代宇 宙 X 線光学系開発の完遂までの道程に幅広い選択 肢を与えてくれる。

以上、偏った分野についてだが筆者らの特に目を ひいた最新のトピックについて触れてきた。筆者ら が発表の場に居合わせ肌で感じたことは、本分野で は世代交代が進み、次世代光学系が大手をふるい闊 歩し、いよいよ大有効面積・秒角の世界がスタンダ ードと認識されつつあることである。こうした潮流 の中で我々はどこに舵を切るのか、改めて立ち止ま り、長い目で向かう先を考える良い機会となった。 そして来夏には SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation が英国エディンバラにて予定され ており、筆者らも決意を新たにのぞむつもりである。 最後に、2016 年初頭には我が国 6 番目となる次期 X 線国際天文衛星 ASTRO-H が打ち上がる。本研究室 が主導し製作してきた2台の光学系を含む、計4 台の X 線光学系が新たな激動の宇宙をとらえ、X 線 天文学の新時代を切り拓くことが期待されている。 本誌次号に日本の X 線光学系の活躍の様子が掲載

されることを、今から胸躍らせながら筆を置くこと にする。 [2] Zhang et al., Proceedings of the SPIE, 9603 (2015) 96030Q.

## 参考文献

[1] Bavdaz et al., Proceedings of the SPIE, 9603,(2015) 96030J.



## 編集部より

本ニュースレターに記事を寄せて頂いた岡島氏も書いておられますが、X線結像光学研究会に長く貢献してこられた名古屋大学名誉教授山下広順先生がお亡くなりになられました。来年早々に打ち上げ予定のASTRO-H衛星には、先生の執念の結実である多層膜スーパーミラーによる硬X線望遠鏡が搭載されます。ASTRO-Hで新たな宇宙物理を切り開き、その成果をいつの日かこのニュースレターでご報告すること、そしてX線結像光学研究会をますます活発なものにすることが、先生への最大の恩返しになると思っています。今後も本誌のご支援、ご協力をよろしくお願い申し上げます。 (文責・松本浩典)

【第13回X線結像光学シンポジウムのご案内】

第十三回X線結像光学シンポジウムが以下の日程・場所で開催されます。

日程:平成27年11月17日(火)~18日(水)

場所:名古屋大学野依記念学術交流館(東山キャンパス)

詳細については、以下の Web ページをご覧ください。

http://fennel.u.phys.nagoya-u.ac.jp/xio13th/

皆様の積極的なご参加を心よりお待ちしております。

第十三回X線結像光学シンポジウム事務局

田原譲

名古屋大学大学院理学研究科

素粒子宇宙物理学専攻

宇宙物理学研究室(U研)X線グループ

※本シンポジウムに関する問い合わせ先: xio13th@u. phys. nagoya-u. ac. jp

【メーリングリスト(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 情報を配信したいときなどにも便利なので、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. 42(2015 年 11 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)、
		松本浩典(名古屋大)
		E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp

『平成27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)、松本浩典(名古屋大)、東口武史(宇都宮大)、 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(東京大学新領域および(株)トヤマ) 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)

- \*新任: 加道雅孝(原研)
- •特別顧問:

波岡武(東北大名誉教授) 青木貞雄(筑波大名誉教授)