

# X線結像光学ニュースレター

No. 40 2014年10月発行

## 4次元CT法を用いたタイヤゴムの路面凹凸に対する変形挙動の観察

住友ゴム工業株式会社

間下亮, 岸本浩通

### 1. 緒言

環境への配慮が世界的に求められており、自動車業界においても例外ではない。自動車は燃料エネルギーの約20%をタイヤの転がり抵抗に空費しており、タイヤの低燃費化による環境配慮が課題となっている。ところが、タイヤの転がり抵抗を低減させると、雨で濡れた路面などを走るときに大切なグリップ性能が低下してしまうため、これらの性能を両立させる技術の開発が必要となる。

タイヤのグリップ性能を考える上で重要な挙動として、路面凹凸に応じたタイヤ表面および内部の変形挙動が挙げられる。タイヤ表面と内部の変形挙動の差により発生するヒステリシスロスが、タイヤのグリップ性能と関係していることから、動的変形下でのタイヤ表面および内部の変形挙動の観察が必要である。タイヤの変形挙動を観察する方法として、透明なガラス平板にゴムを接触させ、反対側からガラス平板越しにCCDカメラ等を用いて観察する方法[1]や、路面にゴムを接触

させ、側面からゴムの変形挙動をCCDカメラ等で観察する方法[2,3]がとられてきた。しかし、実際のタイヤは路面の複雑な凹凸から刺激を受け、様々な周波数の外場がゴムに加えられるため、ガラス平板のように平坦な路面や、接触側面における変形解析だけではタイヤグリップ現象を解明するには不十分であった。また、路面の凹凸に対するゴム表面および内部の変形挙動の観察にはX線CT法が有効であるが、従来の方法ではタイヤ用ゴムの動的変形挙動を観察することは困難であった。

そこで、本研究では、SPring-8 BL20B2にて開発を進めてきた路面の凹凸に対する動的なゴムの変形挙動を観察することが可能な4次元X線CT法を用いて、路面の凹凸に対しゴムを連続接触させた時の動的変形挙動を観察した結果を報告する。

### 2. 実験

#### 2.1 試料

表1にゴム試料の配合を示す。日本ゼオン社製のスチレン-ブタジエン共重合ゴム(SBR; スチレン/ブタジエン = 23.5/76.5)を用い、各配合物をバンバリーミキサーで混合した。混合物をローラー状成型金型で170°C12分間プレス加硫した。得られたゴムローラーは外径60mm、内径25mm、幅10mmの筒状ローラーである。

表1 Sample recipe (weight ratios normalized with SBR)

SBR	100
Stearic acid	2
Zinc oxide	2
Sulfur	1.5
TBBS	1

Abbreviations: SBR, styrene-butadiene rubber; TBBS, *N*-tert-butylbenzothiazole-2-sulphenamide.

## 2.2 ゴム加振試験機

図1にゴム加振試験機および制御系の概略図を示す。ゴム加振試験機は、ステッピングモーターの回転軸にカムを設置することで、モーターの回転に応じてゴムローラーが上下に振動する仕組みとなっている。加振部は天板に固定されており、ゴムローラー部のみ上下振動する。ここで、実際に自動車走行中にタイヤへ与えられる刺激は、タイヤの回転周期に応じたパルス状の刺激である。よって本ゴム加振試験機では、路面に対しゴムローラーを上下振動させることで、走行時の入力刺激がゴムローラーに印加される仕組みとなっている。ゴムローラーの上下振動周波数を1Hzとした。つまり、ゴムローラーが最上部から0.5秒後に最下点に到達し（負荷過程）、その後さらに0.5秒かけて最上部まで戻る（除荷過程）といった挙動となる。ゴムローラーへの荷重は、ゴムローラーの上下振幅を一定とし、Z軸ステージを上下させることで任意の値に制御することができ、荷重が20NとなるようZ軸ステージを調整した。路面は、実際の路面のレプリカをアクリルで作製したものをを用いた。

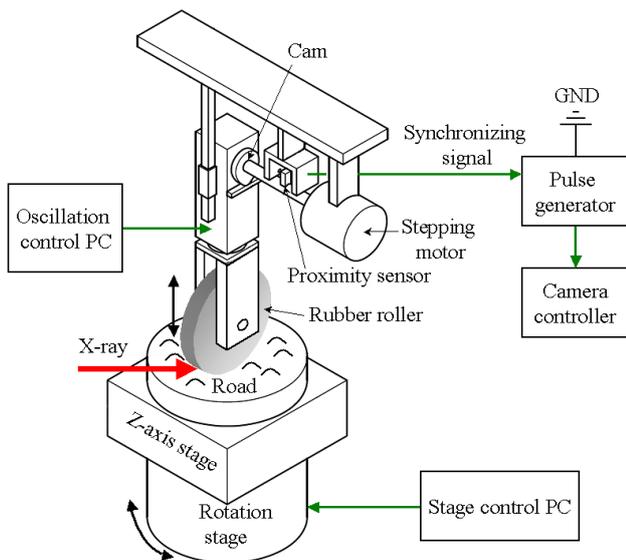


図1 Schematic diagram of the apparatus.

## 2.3 X線4次元CT法

実験はSPring-8 BL20B2 第1ハッチにて実施した。X線エネルギーは25 keV、X線露光時間は30 msとした。検出器はビームモニター+X線 CCD カメラ(浜松ホトニクス製 C4880-41s)を用いた。カメラのピクセル分解能は11.9 $\mu$ mである。ゴム加振試験機とCT装置は近接センサーから出力される TTL 信号によって同期させ、パルスジェネレーターを用いて試料回転ステージや撮影タイミングを取ることで、ゴムローラー上下振動時のゴムと路面の接触状態の動的変形挙動を観察した。

## 3. 結果

4次元CT法によって得られた投影像を再構成し、ある断面におけるスライス画像を図2に示す。スライス画像から、路面の凹凸に応じてゴムが変形していることがわかる。このように、路面に連続接触させた状態でのゴム動的変形挙動の3次元可視化に成功し、任意の瞬間および任意の断面において、路面の凹凸に対するゴムの変形状態の解析が可能となった。

図3にゴムと路面との接触面における(a)負荷過程および(b)除荷過程のゴムの変形挙動

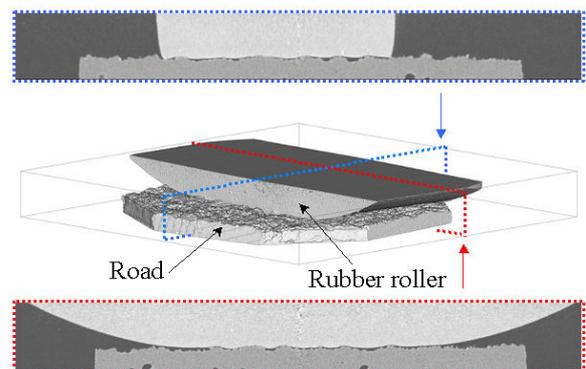


図2 3D and cross-sectional images of the road and rubber roller reconstructed by the computed tomography technique.

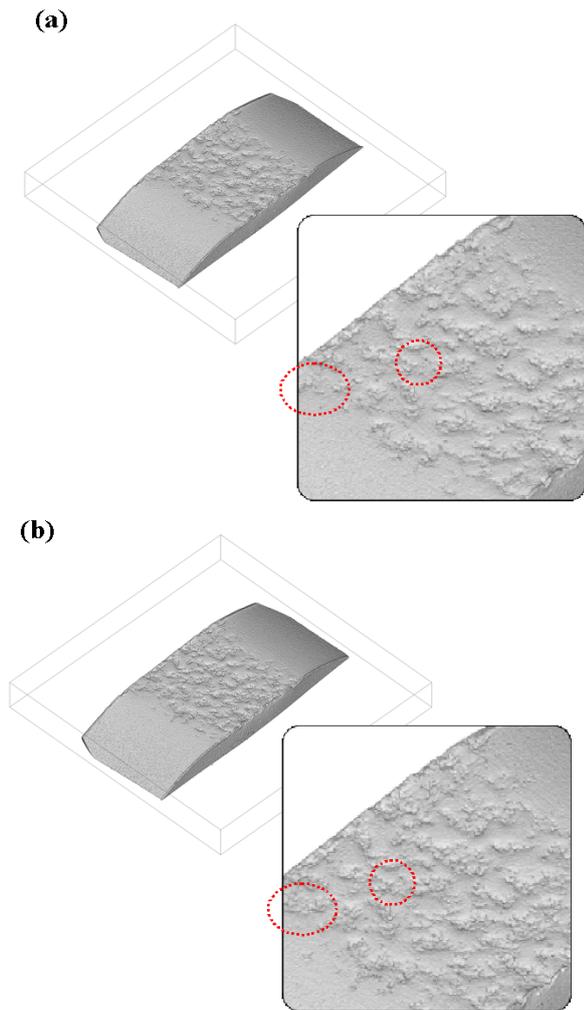


図3 Deformation behavior of rubber in a contact face between the rubber roller and the road: (a) loading process and (b) unloading process.

動を示す。図3に示した画像は、画像処理により路面部を消去し、ゴム部のみを取り出している。負荷過程と除荷過程では、除荷過程の方が路面との接触面積が大きいように見られたことから、路面凹凸への接触前後でゴムの緩和による応答遅れが生じていると推定される。このように4次元CT法では、従来の観察方法では困難であった路面の凹凸に対するゴムの動的変形挙動を観察することに成功した。

負荷過程と除荷過程におけるゴムの動的変形挙動を定量的に比較するため、ある断面における接触面積をカウントし、Delay timeに

対してプロットしたものを図4に示す。Delay time とはX線照射タイミングであり、ゴムローラーの上下位置を意味している。すなわち 0ms および 1000ms ではゴムローラーが最上部に位置し、500ms で最下点に位置している。各上下位置において、負荷過程よりも除荷過程の方が接触面積が大きい結果が得られた。これは、路面の凹凸と接触することによって生じるゴムの変形が負荷過程と除荷過程で異なるといった、ヒステリシス現象を表している。つまり、自動車走行時を模擬した使用環境下において、路面との接触前後でのゴムのヒステリシス現象を確認することができた。ヒステリシス現象中に散逸されるエネルギーは、タイヤのグリップ性能に影響を及ぼすことから、本研究がグリップ性能向上の一端を担うと期待される。

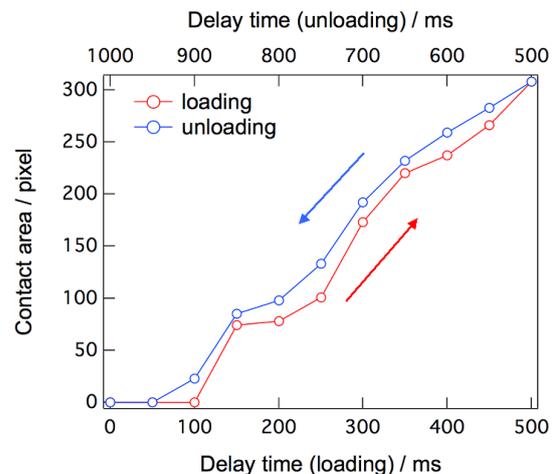


図4 Delay time dependence of contact area between the rubber roller and the road.

#### 4. 謝辞

SPring-8 BL20B2 での実験を行うにあたり、JASRI 上杉健太郎 博士、星野真人 博士にご支援、ご協力頂き、深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1]Barquins, M., *Mater. Sci. Eng.* **73**, 45 (1985).  
[2]Uchiyama, Y., *Wear* **158**, 141 (1992).  
[3]Iwai, T., *Wear* **259**, 669 (2005).

# X線 SOI ピクセル検出器

## - 次世代X線天文衛星のワイドバンド撮像分光器

京都大学理学部物理第二教室 鶴 剛

### 1. はじめに

私達は次世代の X 線天文学の開拓に向け、衛星搭載用の X 線 SOI ピクセル検出器 (SOIPIX) を開発している。X 線 CCD と同じ撮像分光能力を備えた上で、私達独自のイベント駆動読み出し機能により $\sim\mu$ 秒の時間分解能が可能である。これにより反同時計測を実現し、特に 5-10 keV 以上で問題となる非 X 線バックグラウンドを大幅に下げる。これまで不可能だった微弱な X 線天体の検出を可能にし、0.3-40 keV の 2 桁の帯域にわたる精密撮像分光を実現する。この記事ではその概要と開発の現状を紹介する。

### 2. 開発の動機

「すざく」衛星を始めとする最新鋭の X 線天文衛星が搭載する主観測装置は X 線 CCD カメラである。ファノ限界に迫る読み出しノイズ、20-30mm 口の大きな撮像領域と 20-30 $\mu$ m 口のピクセルサイズによる精密撮像が可能である。私自身も「すざく」や近々打ち上げられる ASTRO-H 衛星に搭載する X 線 CCD カメラを開発してきた [1, 2]。その経験からも、X 線 CCD は大変素晴らしい撮像分光器であると断言できる。しかし、いくつか重大な欠点がある。その最大は「非 X 線バックグラウンド」が

高いことである。

非 X 線バックグラウンドとは、衛星軌道上の高エネルギー粒子が作るイベントで X 線と区別できないイベントである。これが高いと、暗い天体は検出できないし、スペクトルの質も落ちる。図 1 (左) は「すざく」に搭載した X 線 CCD カメラ (XIS) で実際に衛星軌道上で得た生 CCD 画像 (の一部) である。通常、X 線イベントが作る信号はコンパクトで、 $2\times 2$  ピクセル内に収まる。その一方、軌道上の高エネルギー粒子は長いトラックを引く。そこで信号の拡がりで両者の区別 (除去) を行う。しかし、中には高エネルギー粒子に起因するにも関わらず、コンパクトなイベントも存在する。X 線と区別できないので、取り除く事の

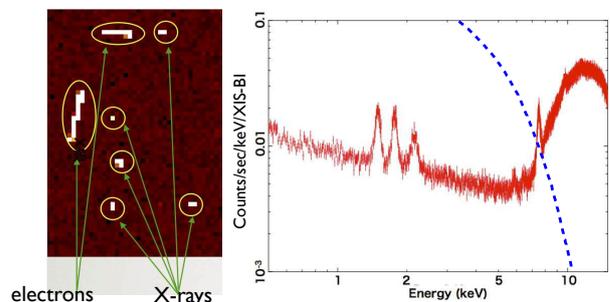


図 1 (左)「すざく」XISで軌道上で得た生 CCD イメージ。(右)除去できずに残った XIS-B1 の非 X 線バックグラウンドのスペクトル [3]。青い点線は光子指数 2.0 のスペクトルを持つ拡がった X 線天体 (表面輝度  $10^{-14}$  ergs/s/cm<sup>2</sup>/arcmin<sup>2</sup>) の例。

できないバックグラウンドとなってしまう。これが「非 X 線バックグラウンド」である。図 1(右)はその除去できずに残ってしまった「非 X 線バックグラウンド」のスペクトルであり、特に 5keV 以上で急激に高くなる[3]。つまり X 線 CCD カメラで暗い硬 X 線天体を観測することは難しい。

そこで私達は次世代の X 線天文学を切り拓くべく新しい検出器「X 線 SOI ピクセル検出器 (X 線 SOIPIX)」を開発している[4-13]。X 線 CCD と同じ精密撮像分光能力を備えた上で、各ピクセルに組み込んだトリガ回路により「イベント駆動読み出し」を実現、高い時間分解能 (~マイクロ秒) と高速読み出し (イベントレート ~kHz) を可能にする。これが本 X 線 SOIPIX の最大の特徴である。表 1 に私達が目標としている性能を示す。

項目	仕様
撮像領域	25 × 25 mm <sup>2</sup>
ピクセルサイズ	30-60 μm
帯域	0.3-40 keV
エネルギー分解能	140 eV (FWHM) at 6 keV
読み出しノイズ	要求 10 e, ゴール 3 e (rms)
時間分解能	10 μsec
カウントレート	2 kHz
非 X 線バックグラウンド	20 keV で CCD の 1/100 (5×10 <sup>-5</sup> cps/keV/10×10mm <sup>2</sup> )

### 3. X 線 SOIPIX

SOI は Silicon-On-Insulator の略であり、SOIPIX は低比抵抗 Si 層の回路部、SiO<sub>2</sub> 層の絶縁部、高比抵抗 Si 層の X 線検出部の 3 層構造を持つ(図 2)。高比抵抗 Si 層の厚い空乏層で X 線を検出する。生じた電荷を SiO<sub>2</sub> 層に穴を開けて設けたインプラントを通じて低比抵

抗 Si 層に作り込んだ回路部に導く。この方法で高い X 線検出効率(高比抵抗 Si の厚い空乏層が必要)と高速の CMOS 回路(低比抵抗 Si が必要)を無理なく両立できる。従来のピクセル検出器は、面状に電極を持つ特別な 2 次元アナログ IC の上に X 線検出部を置き、両者をバンプボンディングで繋ぐという複雑な構造を持つ。それに対し SOIPIX 素子は完全に 1 つの素子であり、高い信頼性を低コストで得られる。絶縁部は低比抵抗 Si 層で隣り合うトランジスタをお互いに完全に分離するので、寄生容量を小さくできる。また高速・低消費電力、ラッチアップフリー、高い放射線耐性など、通常の CMOS に比べ優れた性能を持ち、宇宙での使用に最適である。

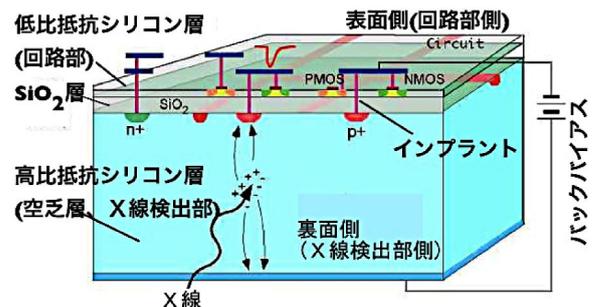


図 2 X線SOIPIXの断面図。SiO<sub>2</sub>を挟んで低比抵抗部と高比抵抗部に分かれている。SiO<sub>2</sub>に穴をあけて高比抵抗部でX線が作る電荷を低比抵抗部に導入する。低エネルギーX線の感度を上げるために、完全空乏化させた上で高比抵抗シリコン側から入射させる(裏面照射)。

私達は低いバックグラウンド性能を得るために、X 線 SOIPIX 素子をシンチレーターで囲い「反同時計数」と呼ばれる読み出しを行う(図 3)。シンチレーターで覆われた側方や下方から入射する高エネルギー粒子は、SOIPIX と同時にシンチレーターにも信号を作る。それに対し、観測対象の天体からの X 線は(X 線ミラーで集光され)上部より SOIPIX に入射する。この場合はシンチレーターから

の信号出力はない。従って SOIPIX がイベントを検出したタイミングで、シンチレーターが信号出力をしているか否かを見る事で、非 X 線バックグラウンドの除去ができる。この反同時計数法は非常に強力で、20keV で X 線 CCD の実に 2 桁低いバックグラウンドを実現できる。

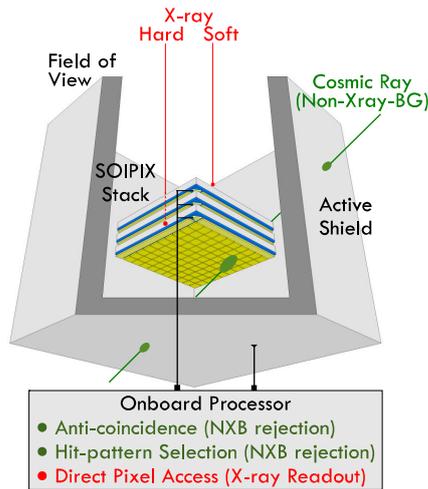


図3 X線SOIPIXカメラの模式図。X線SOIPIX素子の周辺をシンチレーターが囲んでいる。

高エネルギー粒子は軌道上に大量に存在し、それゆえシンチレーターの信号出力レートも kHz に達する。これより十分高い時間分解能が X 線検出素子には要求される。そこで私たちは SOIPIX に各ピクセルにアナログ信号出力回路と共に閾値判定とトリガ出力回路を搭載し、高い時間分解能を実現する。

「イベント駆動読み出し」と「バックグラウンド除去」の手続きを説明する。閾値を超えた信号(X 線または高エネルギー粒子)があるピクセルに入力すると、直ちにそのピクセルからトリガ信号が出力される。それを撮像領域周囲の(素子内部の)デジタル回路が受ける。そしてトリガ信号と共にピクセル座標も合わせて素子外部に出力する。FPGA がそれを受けて、シンチレーターからの信号を確認する。非 X 線バックグラウンドと判定すれば、

SOIPIX のリセットを行い、再びイベント待ち状態にする。X 線であると判定すれば、FPGA は SOIPIX の当該ピクセルにアナログ出力をさせ、その読み出しを行う。

ピクセル内の閾値判定・トリガ回路の性能で時間分解能が決まる。既に目標の 10 $\mu$ 秒は達成しており、改良によりさらに高速にする。X 線 CCD では目的とするピクセルを読み出すために、それ以外の全てのピクセルを読み出さなければならない。しかも、読み出して初めて X 線が入射したかがわかる。少々言い方は悪いが、X 線 CCD ではほとんど無駄な読み出しを行っているということである。一方で、X 線 SOIPIX は信号入力があったピクセルのみを読み出すために、効率が良い。それゆえ高イベントレートの観測が可能である。つまり、X 線 CCD では不可能な微弱な天体を観測できることに加え、実は X 線 CCD ではパイルアップするので観測できない明るい天体も X 線 SOIPIX は観測が可能である。

#### 4. 現在の開発状況

私達は 2010 年に開発を開始し、この 5 年間で 7 個のテスト素子を開発した。一気に大きな素子を作るのではなく、低コストの小さな素子(チップサイズ 2.4mm $\square$ -6.0mm $\square$ )として製作し、出来るだけ高い頻度でフィードバックを掛ける事になっている(図4)。

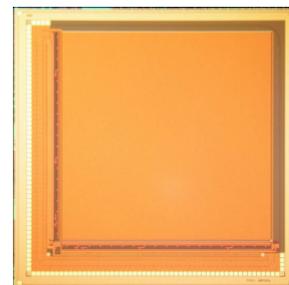


図4 XRPIX2b. チップサイズ6mm $\square$ , 撮像領域4.5mm $\square$ , ピクセルサイズ30 $\mu$ m $\square$ である。現在、京大をはじめとする8つの大学・研究機関で使用されている。

既に  $500\ \mu\text{m}$  の厚い空乏層と完全空乏は達成している [5, 10]。分光性能の開発は、まず CCD と同様に全ピクセルを読み出す「フレーム読み出しモード」で進めている。動作が単純でピクセル回路内部の干渉の問題が少ないからである。開発当初は Cd-109 を照射し、 $22\text{keV}$  X 線とおぼしき「肩」をヒストグラムに見いだして感激していた。その後、読み出しノードの寄生容量を減らす、各ピクセルに電荷有感アンプを組み込む等の努力を行い、徐々に性能を向上させた [4, 6, 7, 9, 10, 13]。最新の素子である XRPIX3b では読み出しノイズは  $33e^-$  (rms)、エネルギー分解能  $320\text{eV}$  ( $6\text{keV}$  X 線に対する FWHM) を達成し、 $^{55}\text{Fe}$  の Mn-K $\alpha$  と K $\beta$  の分離に成功した (図 5) [9]。

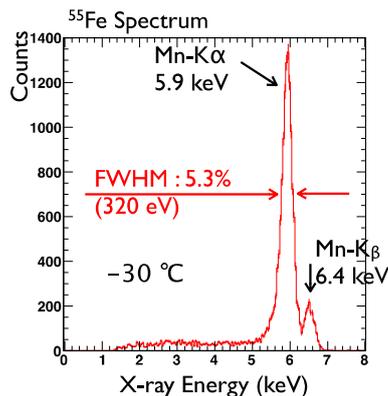


図 5 X線SOIPIX (XRPIX3b) で得た $^{55}\text{Fe}$ のX線スペクトル [9]。全てのピクセルを使用している。

本命のイベント駆動は、読み出し自身は問題なく動作しており、 $10\ \mu$  秒の時間分解能と、 $1\text{kHz}$  以上の高レート検出を既に達成している [8]。常温の蛍光灯下で  $^{241}\text{Am}$  からの  $10\text{--}30\text{keV}$  の多数の X 線を 4 本の分解し、 $60\text{keV}$  X 線も検出できている (図 6)。電荷有感アンプを搭載していない 1 世代前の素子を使用している事もあり、エネルギー分解能は  $1\text{keV}$  である。様々な試験から、イベント駆動時に配線や回路素子の間で干渉が起こっている事を確認した [11]。次回の素子では、その点を改善

できる見込みである。

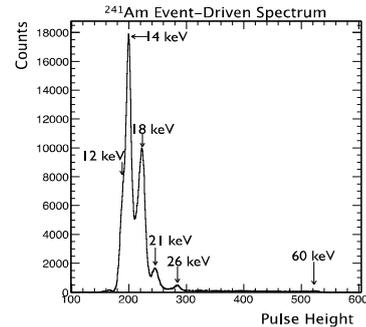


図 6 常温・蛍光灯下で、XRPIX2b (電荷有感アンプの無い素子) のイベント駆動読み出しモードで得た、 $^{241}\text{Am}$  の X 線スペクトル。全てのピクセルを使用している。

SOIPIX のような複雑なイメージングセンサの開発には小さくない予算が必要である。幸いにも 2013 年度から科研費・新学術領域「3 次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開 (代表: KEK 新井康夫教授)」を開始させて頂く事ができた [14]。SOIPIX の 1 つの大きな魅力は、ピクセル回路によって色々な性能や機能を持たせ、それぞれの研究分野に最適な検出器を実現できることである。例えば、放射光実験用には各ピクセルにアナログ出力の代わりにカウンタを設けた素子も存在する。この特徴を活かし、この新学術では理学・工学の様々な分野の研究者が結集、連携と協力を行って、それぞれの目的に最適な SOIPIX の開発研究を行っている。私は計画研究「宇宙最初期ブラックホールの探査研究を実現する衛星搭載 X 線精密イメージングの開拓」で X 線衛星用の開発を進めており、この新学術を通じ、これまで接点の無かった放射光やイメージセンサー分野の研究者と共同開発を開始している。目から鱗が落ちるようなデザインや、こんなことも出来るの、という驚きもしばしばであり、とてもわくわくしている。

話がややそれてしまった。私達の X 線 SOIPIX は、目標性能への到達へ向け、今年

(2014 年)の夏に新学術の共同開発を通じて素子の大幅な設計の見直しを行った。そのプロセスを2014年10月から開始した。2015年初頭に完成する。どのような性能を見せてくれるのか、大いに楽しみにしている。その後、いよいよ衛星搭載に向けた大型の素子の製作を開始しようと考えている。

## 追記

本記事をお読みの方でも、既存の検出器には無い機能や性能が欲しいと思っらっしゃる方がいらっしゃるのではないのでしょうか? その場合には是非、SOIPIXの可能性を御一考ください。何かお役に立てるかもしれません。

## 参考文献

- [1] K. Koyama, H. Tsunemi, T. Dotani, M. W. Bautz, K. Hayashida, T. G. Tsuru, et al. PASJ, 59, S23–S33 (2007)
- [2] H. Tsunemi, K. Hayashida, H. Nakajima, T. G. Tsuru, T. Tanaka, et al., Proc. SPIE, 8859, 88590C (9 pages) (2013)
- [3] N. Tawa, K. Hayashida, M. Nagai, H. Nakamoto, H. Tsunemi, et al., PASJ, 60, S11–S24 (2008).
- [4] S. G. Ryu, T. G. Tsuru, S. Nakashima, A. Takeda, Y. Arai, et al., IEEE TNS, 58, 2528–2536 (2011)
- [5] S. Nakashima, S. G. Ryu, T. G. Tsuru, A. Takeda, Y. Arai, et al., PhysProcedia, 37, 1373–1380 (2012)
- [6] S. G. Ryu, T. G. Tsuru, G. Prigozhin, S. Kissel, M. W. Bautz, et al., IEEE TNS, 60, 465–469 (2013)
- [7] S. Nakashima, S. G. Ryu, T. Tanaka, T. G. Tsuru, A. Takeda, NIM A, 731, 74–78 (2013)
- [8] A. Takeda, Y. Arai, S. G. Ryu, S. Nakashima, T. G. Tsuru, et al., IEEE TNS, 60, 586–591 (2013)
- [9] A. Takeda, Y. Arai, T. G. Tsuru, T. Tanaka, S. Nakashima, et al., IEEE NSS 2013, Conf. Record, 1–4 (2011)
- [10] H. Matsumura, T. G. Tsuru, T. Tanaka, S. Nakashima, S. G. Ryu, et al., NIM A, in press (2014)
- [11] A. Takeda, T. G. Tsuru, T. Tanaka, H. Matsumura, Y. Arai, et al., NIM A, accepted (2014)
- [12] T. G. Tsuru, H. Matsumura, A. Takeda, T. Tanaka, S. Nakashima, et al., Proc. SPIE. 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, 914412 (2014) (arXiv:1408.4556)
- [13] H. Matsumura, T. G. Tsuru, T. Tanaka, A. Takeda, Y. Arai, et al., NIM A, submitted (2014)
- [14] <http://soipix.jp>

## 会議報告「International Workshop on

### Phase Retrieval and Coherent Scattering (Coherence 2014)」

大阪大学大学院工学研究科/理化学研究所放射光科学総合研究センター 高橋幸生

2014年9月2日から5日にかけて米国のエバンストン市で開催された International Workshop on Phase Retrieval and Coherent Scattering (位相回復とコヒーレント散乱に関する国際ワークショップ)に参加した。本ワークショップシリーズ(通称:コヒーレンスワークショップ)は、2001年に米国のローレンス・バークレー国立研究所で開催されて以来、2年毎に開催され、今回が7回目にあたる。ちなみに前回は、2012年に理化学研究所放射光科学総合研究センターの主催により福岡市で開催された。コヒーレンスワークショップでは、以下の4つのトピックスをカバーしている。

- コヒーレントX線・電子線によるイメージング

- 光子相関による構造ダイナミクス

- 新光源によるコヒーレント光学の新展開

- 位相回復の理論および計算手法

コヒーレンスワークショップが開催されるようになった背景には、第三世代放射光施設の登場によりコヒーレントX線のフラックスが向上し、それを利用した研究が盛んに行われるようになったことがある。コヒーレントX線利用研究として特に重要なのが1990年代後半に実証されたX線スペックル計測に基づく光子相関分光法とコヒーレント回折イメージングであり、コヒーレンスワークショップでは、これらの研究に関する発表が大半を占めている。また、コヒーレンスワークショップの特徴として位相回復法がトピックと

なっていることが挙げられる。これは、位相回復法がコヒーレントX線回折イメージングにおいて重要な役割を果たすからである(コヒーレント回折イメージングでは、回折強度パターンに位相回復計算を実行し実空間像を再構成する。位相回復法は、1970年代初頭に光学の分野で誕生し、その当時、ブームとなったと聞いている。しかしながら、開口数の大きなレンズを作製可能になった可視光領域では、その必要性がなくなり、1990年代前半に急速に衰退した。X線領域におけるコヒーレント回折イメージングの実証により、位相回復法の重要性が再認識されるようになった)。

今回のコヒーレンスワークショップは、米国のアルゴンヌ国立研究所の主催で、同研究所の Paul Fuoss 博士、Chris Jacobsen 博士、Brian Stephenson 博士がチェアを務めた。開催地のエバンストン市は、シカゴ中心部より北に22 km離れた位置にあるミシガン湖に隣接した都市である。講演会の開催されたノー



図1 講演会の会場となったノースウェスタン大学 Norris センター。

スウェスタン大学 Norris センターは、エバンストン市中心部より約1 km離れた徒歩圏内にある。多くの参加者がエバンストン市中心部にあるホテルオリントンに宿泊し、講演会場まで徒歩で移動した。また、エバンストン市中心部には無数のレストランがあり、食事に困ることはなかった。アルゴンヌ国立研究所が主催する会議はシカゴ市内で開催されることが多い。今回、ノースウェスタン大学での開催となったのは、チェアの一人である Jacobsen 博士がノースウェスタン大学の教授も務めているからであろう。余談であるが、ノースウェスタン大学は、X 線分野で歴史がある。特に、X 線散漫散乱の研究者で教育者としても有名な故・Jerome B. Cohen 教授が研究室（現在でも、J. B. Cohen X-Ray Diffraction Facility が共同利用施設として開放されており、表面 X 線回折で有名な Michael J. Bedzyk 教授の研究室がそれを管理している）を構えていたことで知られる。

講演会は、13 件の招待講演(内 3 件は基調講演)と 27 件の一般講演、63 件のポスター発表で構成されており、筆者は招待講演者の一人として招かれた。日本からは、筆者を含めて 7 名が出席し、それぞれ口頭発表、ポスター発表、座長などを務めた。口頭発表は 12 のセッション (Opening、Imaging1, 2, 3、XPCS1, 2, 3、Ultrafast Imaging、Theory and Computation、New Sources、Imaging for Life Sciences、Advances in Instruments and Methods) から成り、前回と比べると XPCS (X 線光子相関分光) 関係の発表が充実していた。これは、アルゴンヌ国立研究所の管理・運営する第三世代放射光施設 APS において X 線光子相関分光の研究が歴史的に盛んであるためと考えられる。また、前回、前々回のコヒーレント回折イメージングの発表が複数件あったが、今回は、放射光 X 線や X 線自由電子レー

ザーをプローブとする研究発表のみであった。電子線コヒーレント回折イメージングの講演も楽しみにしていた筆者としては少々残念であった。

Opening のセッションでは、CFEL の Henry Chapman 教授が「Think Fourier: Structure and Dynamics Revealed with Coherent Beams」というタイトルで基調講演を行った。講演内容は、コヒーレント回折イメージングの歴史や原理に加えて、SLAC 国立加速器研究所の X 線自由電子レーザー施設 LCLS で行われているシングルショット回折イメージングやシリアルフェムト秒 X 線結晶構造解析の最新の成果に関するものだった。Chapman 教授の講演はこれまで何度も聞いているが相変わらず他の追随を許さない突出した成果を挙げているという印象であった。このセッションでは、この他に元素吸収端でのタイコグラフィによる化学状態イメージングや Bragg タイコグラフィによる双結晶のイメージングに関する講演もあった。Imaging1, 2, 3 の各セッションの招待講演者は、TU Dresden (現: DESY) の Christian Schroer 教授、筆者、APS の Stephan Hruszkewycz 博士の 3 名であった。Schroer 教授からは X 線屈折レンズの設計に関する理論に加えて、それを用いた高分解能コヒーレント回折イメージングの結果と展望についてのお話を聞くことが出来た。筆者は全反射集光鏡を駆使した高分解能コヒーレント回折イメージングと最近取り組んでいるマルチスラ

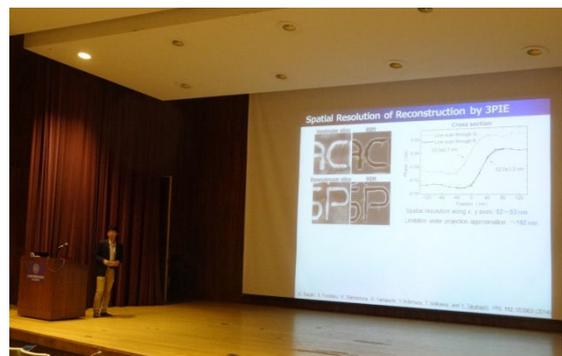


図2 筆者の講演している様子。

イスアプローチによる厚い試料の高分解能イメージングについて講演した(図 2)。Hruszkewycz 博士からは、Bragg タイコグラフィによるナノデバイスの歪みイメージングと新しい三次元イメージング法についての講演がなされた。Imaging 1, 2, 3 のセッションでは、この他にフーリエ変換ホログラフィによる磁気イメージング、Bragg 配置のコヒーレント回折イメージングによる歪みイメージングに関する講演があった。

コヒーレントイメージング(コヒーレント回折イメージングとホログラフィの総称)に関する講演は、Ultrafast Imaging、Theory and Computation、Imaging for Life Sciences、Advances in Instruments and Methods の各セッションでも行われた。Ultrafast Imaging のセッションでは、X 線自由電子レーザーを光源に用いたコヒーレントイメージングに関する報告がなされた。スタンフォード大学の Jesse Clark 博士が招待講演者として LCLS で行われたポンププローブ-コヒーレント回折イメージングによるナノ粒子中の格子ダイナミクスの可視化についてのお話をされた。このセッションでは、この他に LCLS で行われたフーリエ変換ホログラフィによる磁気ダイナミクスの研究や日本の X 線自由電子レーザー施設 SACL A で行われた金属ナノ粒子の三次元イメージングに関する講演もあった。Theory and Computation のセッションは、位相回復法や三次元像再構成法の理論や計算が主題である。Paul Scherrer Institute (PSI) の Manuel Guizar-Sicairos 博士が「3D Ptychography - Algorithms, Challenges, and Applications」というタイトルで PSI における X 線タイコグラフィの成果と将来展望について基調講演を行った。Sicairos 博士は位相回復計算の権威である J. R. Fienup 教授の研究室で博士の学位を取得しており、位相回復計算を得意としている。近年、PSI の

cSAXS ビームラインから X 線タイコグラフィによる実試料観察に関する成果が次々として出ているのは、Sicairos 博士が位相回復計算のためのソフトウェア作成を一手に引き受けて、ユーザーフレンドリーな環境が整備されているためである。このセッションでは、この他にコヒーレント回折による結晶積層欠陥と転位のイメージングの理論的研究、信号対雑音比の悪いコヒーレント回折強度パターンからの像再生、位相コントラストトモグラフィの再構成アルゴリズムに関する講演があった。Imaging for Life Sciences のセッションでは、コヒーレント X 線回折による生命科学への応用が主題である。ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドンの Felisa Berenguer 博士は招待講演者としてコヒーレント Bragg 回折によるカラーゲンのイメージングに関してお話された。また、このセッションでは、X 線自由電子レーザーによる生きたウィルスのシングルショットイメージング、凍結試料の X 線タイコグラフィと蛍光 X 線マッピングの同時測定法の開発、三次元タイコグラフィによる生物試料の観察に関する講演もあった。Advances in Instruments and Methods のセッションでは、SLAC 国立加速器研究所の Gabriella Carini 博士が招待講演者として LCLS における二次元 X 線検出器開発の現状について報告された。また、このセッションではインラインホログラフィを組み合わせた X 線タイコグラフィ、硬 X 線領域の元素識別 X 線タイコグラフィ、部分コヒーレント X 線の伝播のシミュレーションに関する講演もあった。

XPCS 1, 2, 3 の各セッションでは、X 線光子相関分光法を用いた様々な応用研究の結果が報告された。XPCS 1 のセッションでは、X 線スペックル散乱計測のパイオニアであるマギル大学の Mark Sutton 教授が「Beyond Simple Time Correlations」というタイトルで基調講

演を行った。Sutton 教授は、X 線光子相関分光法の原理について詳細な説明をした後、 $\text{Cu}_3\text{Au}_4$  の規則-不規則変態、Co のマルテンサイト変態、 $\text{TaS}_2$  の電荷密度波の研究に X 線光子相関分光法を応用した結果についてお話された。XPCS2, 3 のセッションでは、それぞれ ESRF の Beatrice Ruta 博士、ALS の Sujoy Roy 博士が招待講演を行い、ガラス中の原子再配列を可視化した結果、反強磁性体の磁気ドメインの揺らぎを調べた結果についてお話された。XPCS1, 2, 3 のセッションでは、この他に表面/界面のダイナミクスへの応用や LCLS での装置開発等に関する講演があった。New Sources のセッションでは、European XFEL の Massimo Altarelli 博士から European XFEL の開発状況と XFEL によって拓かれるサイエンスについてのお話があった。また、MAX IV 研究所の Christoph Quitmann 博士からは、低エミッタンス蓄積リングの建設についての話があった。このセッションでは、この他に Table-Top XUV 光源の開発とそれを用いたコヒーレント回折イメージングの報告もあった。

9 月 3 日と 4 日の夕方には、口頭発表とは別の会場でポスターセッションが行われ、ワイン、ビールなどのアルコール飲料とフィンガーフードが用意された。ポスターセッションでは、次代を担う若手研究者・大学院学生からの発表が大半を占めた。また、9 月 4 日には、ポスターセッション終了後、ミシガン

湖沿いのレストランでバンケットが開催された。ウェルカムドリンク後のテーブルディナーでは、Jacobsen 教授とご夫人とのデュエット、出席者全員での合唱など、終始和やかな雰囲気の中、食事と会話を楽しむことができた。

講演会全体を通しての印象だが、前回と比べ、コヒーレントイメージング、X 線光子相関分光法に関する報告の多くが実試料測定に関するものであった。これは、これらの手法が概ね確立され、徐々に応用フェーズへと移行していることの現れであろう。また、前回と比べて、若手研究者の参加・発表が多かったように思える。この分野に興味をもって新たに参画する若手研究者が増えていることは大変喜ばしいことである。一方で、この分野を牽引してきたコヒーレンスワークショップの常連メンバーの欠席者が目立った。これは、本会議のトピックスを部分的にカバーする国際 X 線顕微鏡会議 (XRM2014) と開催時期が近かったことなどの理由が考えられる。次回のコヒーレンスワークショップは 2016 年に欧州で開催されるとのことである。この分野がこれから 2 年間でどの程度進展するのかとても楽しみである。



## 編集部より

2012年4月より編集部の役を仰せつかり、No. 36 (2012年10月配信) から数えて、自身の責任編集号は3つ目となりました。執筆者の方々はもちろん、ご協力くださった各方面の方々に深く御礼申し上げます。今号より、編集部新たに名古屋大学 (素粒子宇宙起源研究機構) 松本浩典准教授が加わられました。物性方面に偏りがちだった編集部ですが、宇宙分野の専門家が増え、より広い目で本誌の分野を俯瞰できるようになりました。本分野の広がり・交流に僅かでも貢献できるよう、努力してまいりますので、今後とも本誌をよろしくお願ひ申し上げます。 (文責・齋藤彰)

### 【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. 40 (2014年10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 : 籠島靖 (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)、  
柳原美廣、籠島靖、豊田光紀
- ・ 幹事 :
  - 伊藤 敦 (東海大) 太田 俊明 (立命館大) 籠島 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)