

# X線結像光学ニューズレター

No.22 2005年9月発行

## 「X線観測衛星すざく打ち上げ」報告

名古屋大学大学院理学研究科 國枝秀世

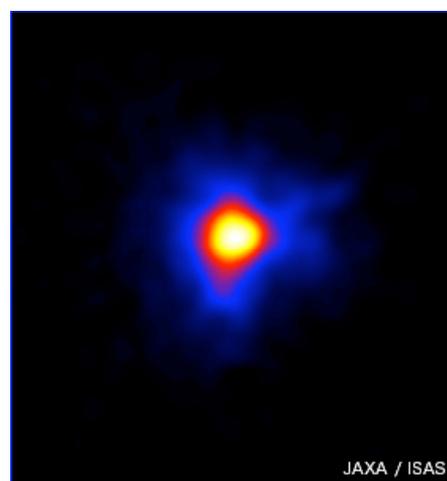
2005年7月10日、バキバキと言う轟音を残して飛び立ったM-Vロケットには、我々の10年来の希望がこめられた衛星「すざく」が載せられています。1986年以来、あすか、Astro-E1, Astro-E2の三衛星のX線望遠鏡を共に作って来た、NASA Goddard飛行センターのSerlemitsos氏と、手を握り合って喜びを共にしました。

衛星は軌道投入後に、三軸制御、太陽電池パドル展開、X線望遠鏡の伸展と矢継ぎ早に操作を行い、衛星としての形態を整えました。20kg5台のX線望遠鏡を載せた光学台を、約4分間かけて1m以上伸展する作業は、ミッションを左右するオペレーションであり、無事にラッチがかかった瞬間には、期せずして拍手が起きました。

そしてこの後、姿勢制御試験をしながら、観測機器を順調に立ち上げました。特に60mKまで冷却し、6keVで6-7eVのエネルギー分解能を持つ分光器(XRS)の性能が宇宙で初めて確認できました。そんな中で、分光器に不安のあるデータが現れたと思っていたところ、突然、タンクのヘリウム30リットルが一気に失われ、最も特長のある分光器が使用不能に陥ってしまいました。この悪夢の様な一瞬の出来事については現在、日米で原因究明が進められています。

一方、残りの二つの観測システム、CCDカメラ(XIS)と硬X線検出器(HXD)は無事立ち上がりました。12日にはCCDカメラでFirst Lightを受け、我々が作った望遠鏡の性能もほぼ予想どおりであることが確認されました。激しい轟音と共に打上げられる姿を見送った我々としては、ホッとした瞬間でありました。更に19日には硬X線検出装置も動きだし、0.3-600keVまでの広帯域のスペクトルが観測できることが確認できました。この2回のイベントについては新聞発表を行い、分光器を除く、二つの検出

システムは順調に観測を始め、いくつかの点でこれまでの衛星にはない、長所が見えて来たことを伝えました。



図：すざくX線望遠鏡で得たX線像

X線望遠鏡としては1993年に打上げた、あすか衛星から見ると、結像性能が3.6分角から2.0分角。有効面積も特に鉄輝線のある7keV付近で2倍以上に強化されました。また、あすか衛星で問題になった迷光を止めるために搭載した、Pre-collimatorは予想通り迷光を1/20にすることに成功しました。今後はこの高感度望遠鏡システムと硬X線検出器を組み合わせ、世界をリードする観測を進めようと、日米欧の研究者が協力して知恵を絞っているところです。良い結果が出たらまたお知らせします。

私達はすざく衛星の高効率望遠鏡に多層膜を応用する事で、80keVまでを撮像する望遠鏡を次期X線天文衛星計画NeXTに向けて開発しています。今は、そのパイロットプログラムとして、気球搭載望遠鏡での観測計画を進めています。すざく衛星の硬X線検出器の観測結果に、この硬X線領域で進める観測の手がかりも期待しています。

## X線暗視野画像診断

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所  
総合研究大学院大学・先導科学研究科 安藤正海

臨床応用を念頭に置いた開発中のX線暗視野法(x-ray dark field imaging : XDFl)の現状を述べる。1997年以来、KEKにおいて筑波大学病院と共同研究を進めている臨床試行"放射光を用いた静脈経由での造影剤注入法による冠動脈造影法"は造影剤を静脈経由で注入することにより、吸収コントラストを用いて冠動脈とその動きをリアルタイムで観察できる。実施例は51例におよぶ。放射光医学利用を始めた20年前は、ガン、脳血管、心臓が3大成人病であった。その後、脳血管と心臓病による死亡数は幸いなことに増加が抑制されまたは減少に転じた。ところがガン死亡率の増加の勢いは留まるところを知らず、現在、他の2つの成人病をあわせたほどの数になっている。

人体には、吸収コントラストでは見えない、または見えにくい軟らかい組織が数多く存在する。X線干渉計を用いて第二のX線コントラストである位相コントラストを用いて、肝ガンなどの視覚化が百生、武田らによって実証されている。

第三のX線コントラストとして、屈折原理を用いる開発が、1990年代初頭、ロシアのグループによって始められた。半ばからは欧米・豪州が、終わりごろから我国の八木のグループと森のグループが開発に加わった。

2002年に私たちは「臨床応用」に向けて、必要線量が病院以下で、より鮮明で、空間解像度に優れた大画面を得ることを最終目標とし、開発を始めた。原理は2結晶平行配置にしたシリコン440反射またはシリコン220反射を用いる。第一結晶は非対称反射、第二結晶は特定厚さにした角度分析作用をもつ透過型結晶である。この角度分析板は患部がない時、前方回折強度はゼロである。患部を角度分析板の前に置くと患部組織境界で生ずる屈折X線のみが前方回折により角度分析板のうしろ側に像が現われる。これをX線暗視野像と呼ぶ。

臨床応用という高い目標を狙うために、新しい技術開発に意欲がある臨床医の協力を得ることが重要であり、九大、岡大、SPring-8、神戸大、筑波大、国立ガンセンター、Stanford大、Kurchatov研、中日友好病院、北京腫瘍病院、清華大、高能

物理所と共同研究を組ませて頂いている。当面、リウマチに関わる軟骨の早期診断、乳ガンなどの早期診断を開発目標に掲げている。さらに肺ガンも目標としたい。関節軟骨については参考文献1,2を、乳ガンについては参考文献3を参照されたい。

厚さ2.124mmの角度分析板を用いて90mm四方の視野による膝、肩、大腿骨頭(図1、参考文献1,2)、数種類の乳ガン(図2、参考文献3)について描画に成功した。

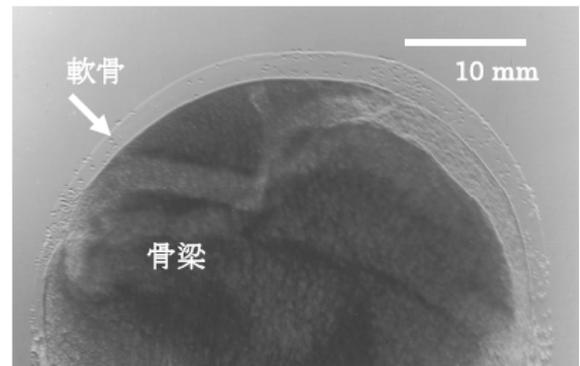


図1 壊死患者から取り出された大腿骨頭を水中に入れX線暗視野像が撮影された。吸収像では見えない軟骨が明瞭に見える。

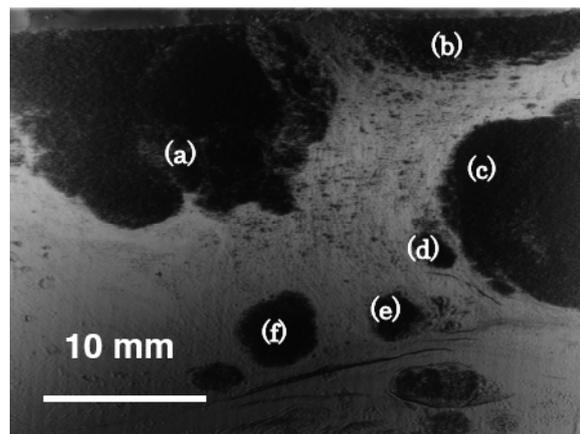


図2 乳頭ガンのX線暗視野(XDF)像。黒い部分(a), (b), (c), (d), (e), (f)は乳ガン細胞の塊。(d)付近を拡大すると乳ガン細胞のひとつつおよび間質が見える。(a)-(f)に囲まれた部分にある点々は石灰化。右下は筋肉。残りは正常細胞。

他の乳ガン、肺などについては引き続き描画を試みている。病院での診断は50ミクロン空間解像度

であると思われるが、放射光を利用することにより、空間解像度は20ミクロン程度に達していると思われる。さらにXDFIのおかげで、極めて高いコントラストを達成していると考えられる。これにより高度かつ早期診断が可能になるとと思われる。125ミクロン厚さの角度分析板を用意することにより、空間解像度は10ミクロン以上に改善され、X線病理診断も夢ではないと期待している。

参考文献：

1 Construction of X-ray Dark-Field Imaging with a View Size of 80 mm Square and First Visualization of Human Articular Cartilage at Femoral Head under a Nearly Clinical Condition, M. Ando, H. Sugiyama, T. Kunisada,

D. Shima, K. Takeda, H. Hashizume and H. Inoue: Jpn. J. Appl. Phys. 43, Part 2, No.9A/B, L1175-L1177, 2004.

2 1の論文は2005年度JJAP論文賞受賞。

<http://www.kek.jp/ja/news/topics/2005/JJAPaward.html> 参照。

3 Attempt at Visualizing Breast Cancer with X-ray Dark Field Imaging, M. Ando, K. Yamasaki, F. Toyofuku, H. Sugiyama, C. Obayashi, G. Li, Lin Pan, X. Jiang, W. Pattanasiriwisawa, D. Shima, E. Hashimoto, T. Kimura, M. Tsuneyoshi, E. Ueno, K. Tokumori, A. Maksimenko, Y. Higashida and M. Hirano: Jpn. J. Appl. Phys. 44, Part 2, No.3B, L528-L531, 2005.

## レーザープラズマ放射極端紫外 (EUV) 光源の開発

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 西村博明

ユビキタス・ネットワーク社会を支えるキーテクノロジーの一つに、半導体集積回路の超微細化がある。これに呼応し、製造現場における縮小投影露光光源はKrFレーザー(波長248nm)からArFレーザー(193nm)へと、その短波長化への歩みを早めている。一方で、わずか15nmの空間にMOS型トランジスタができることが実証された[J. D. Meindl et. al., Science 293, 2044 (2001)]。このような動きを背景に、波長13-14nmの極端紫外線(EUV)を光源とした次世代半導体製造リソグラフィ技術の開発にむけ、熾烈な国際競争が繰り広げられている。

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターでは、文部科学省リーディングプロジェクトの下で国内の大学や研究機関、産業界と協力しながら、極端紫外線(EUV)リソグラフィ用レーザープラズマ光源開発研究を推進している。

### 1. EUVリソグラフィ用露光システムと光源開発の課題

レーザー生成プラズマを光源とした場合を例にEUVリソグラフィ用露光システムの基本構成を図

1に示す。EUV光は吸収長が極めて短く、屈折光学系が使えない。そのため、光の伝送ならびにマスクの縮小像転送には反射光学系が用いられる。

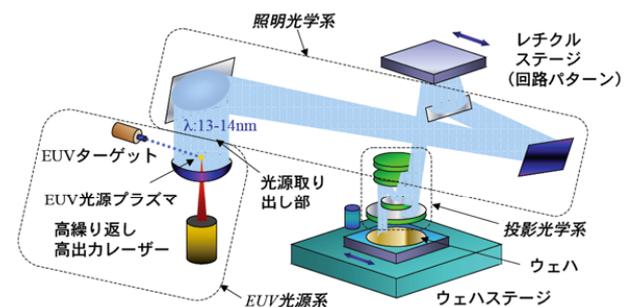


図1 レーザー生成プラズマを光源としたEUVリソグラフィ装置の構成概念

まず、EUV集光光学系の中心に光源材料が連続供給される。これに高繰り返しレーザーパルスが照射されてEUV光の高速パルスが発生する。このEUV光は照明光学系を通してレチクル(反射型マスク)を照らし、回路パターンが投影光学系を通して光レジストが塗布されたSiウエハー上に結像される。光源からSiウエハーまでの間に多層膜反

射鏡（最大反射率～65%）が11～13枚程度介在するため、システム全体の光利用率は1%にも満たない。

露光装置側からEUV 光源に要求されている性能仕様をまとめると表1のようになる。ここではEUV光レジスト感度を5mJ/cm<sup>2</sup>とし、直径30cmのSiウエハーを毎時100枚のスループット（処理能力）で露光することを仮定している。光源の中心波長13.5nmは産業界から推奨されているMo/Si多層膜の反射特性で決まっている。中心波長が11nm近傍にあるMo/Be多層膜鏡は環境保全の観点から除外されている。EUV出力は集光光学系で光源から送り出せるできるパワーで定義されており、集光立体角などを考慮すると光源プラズマにおける値はこの2～3倍が必要となる。

EUV光源の要求性能

EUV波長	13.5 nm	2%バンド幅
EUV出力	115 W	(@照射光学系の入り口)
Etendue	1~3.3 mm <sup>2</sup> sr	
繰り返し周波数	7~10 kHz	
出力安定性	±0.3%	(3σ, 50パルス平均)
装置寿命	> 30,000時間	

表1 産業界が決定しているEUVリソグラフィ光源の要求仕様

光源波長は原子のエネルギー準位で決まるので、物質固有の波長スペクトルを持つ。13.5nm EUV光源として現在有望視されている物質にはSnやXe、Li等がある。SnやLiは比較的変換効率が高いが、デブリ抑制に大きな課題を残している。ここでデブリとはターゲットから放出される微小な飛散粒子やイオンのことで、これらが光学系の表面層を破壊し、あるいは堆積するので、寿命を著しく低下させる。Xeはデブリ抑制やターゲット回収の点で有利であるが、13.5nmあたりの発光スペクトル強度は相対的に弱い。

このEUV光源として、一時期、シンクロトロン放射光が有望視されていたが、スループットに関する産業界の要請値が高いため、今、レーザー生成プラズマ（LPP）あるいは放電プラズマ（DPP）が注目されている（図2参照）。LPPはレーザーコスト低減が重要課題であり、DPPはエネルギー利用率が高いが、電極溶融に伴うデブリ対策が重要課題となっている。

EUVリソグラフィを利用した半導体デバイスの量産時期は2008-2009年度頃といわれている。本研究プロジェクトを通じ、装置化・システム化を分担する経産省プロジェクトとの強い連携のもとで、我が国独自の基盤技術を開発し、国際競争力の優位性確保に貢献したいと考えている。

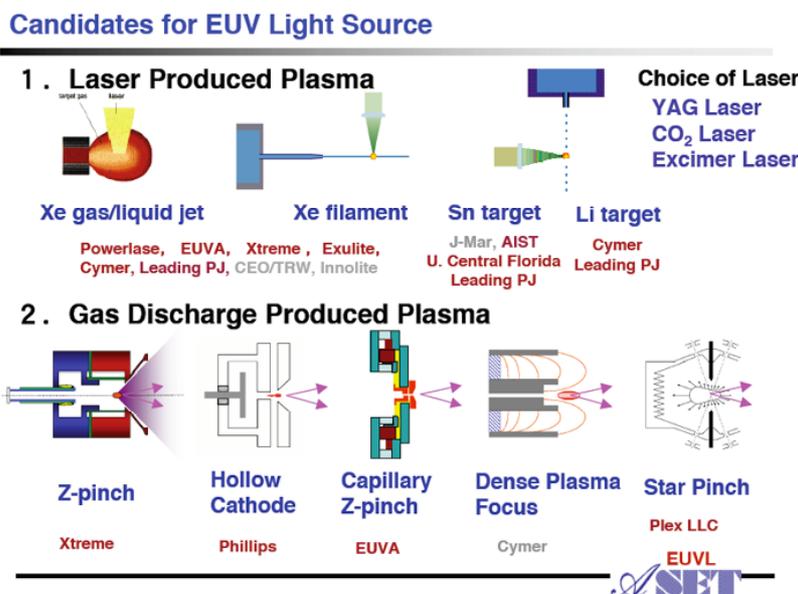


図2 様々なEUV光源：レーザー生成プラズマ(LPP)と放電生成プラズマ(DPP)/オプトロニクス社キーワード解説「光技術総合事典」p15 EUV光源オプトロニクス社編集部編（西山岩男）より引用



## 各種報告

### 【第8回X線結像光学シンポジウム】開催のお知らせ

兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 木下博雄

#### 1 本シンポジウムの内容

X線結像光学は理学と工学あるいは科学と技術の接点に位置し、宇宙科学、生体科学、物質・材料科学、放射光科学、プラズマ・核融合科学、医療技術、精密工学等の分野における研究の進展に大きな役割を果たしています。本シンポジウムでは、エネルギー(波長)領域40eV-100keV(30-0.01nm)における光学・計測技術とそれによる科学研究、およびX線結像光学を支える基盤技術に関する最近の研究成果の発表と将来の展望を議論したいと思います。

多くの方々の参加をお待ちしています。

#### 2 会場

神戸市産業振興センター(神戸市中央区東川崎町1丁目8-4、電話 078-360-3199)  
講演: レセプションルーム(1001、1002)  
ポスター: 会議室(904、905)  
懇親会: レセプションルーム(1001、1002)

#### 3 日時

平成17年12月13日 13:30~19:00 招待講演+ポスター、 19:00~ 懇親会  
12月14日 9:00~16:30 招待講演

#### 4 講演申込み(申し込み先、宛先: 下記の世話人代表)

- 発表申込み締切 10月14日(発表者、所属、題名、懇親会出席者)
- 予稿集原稿締切 11月12日(A4版2枚以内、カメラレディー、白黒、後日書式案内)

#### 5 参加費

参加費(予稿集代を含む): 一般 2,000円、学生 無料。懇親会費: 全員 5,000円。

#### 6 主催

X線結像光学研究会(代表: 筑波大学 青木貞雄)

#### 7 幹事

青木貞雄(筑波大物工)、伊藤敦(東海大工)、太田俊明(東大院理)、加藤義章(原研)、  
木下博雄(兵庫県立大)、国枝秀世(名大院理)、鈴木芳生(JASRI)、田原譲(名大エコトピア科研)、  
常深博(阪大院理)、難波義治(中部大工)、西村博明(阪大レーザー研)、森田繁(核融合研)、  
兵藤一行(高エネ・物構研)、柳原美広(東北大多元研)、山本正樹(東北大多元研)、  
渡辺紀生(筑波大物工)

#### 8 世話人

兵庫県立大学、SPring-8

2005年9月吉日

「第8回X線結像光学シンポジウム」

世話人代表 兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 木下博雄  
678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都3-1-2  
Tel: 0791-58-2546, Fax: 0791-58-2504  
e-mail: kinosita@lasti.u-hyogo.ac.jp

## 【第8回X線顕微鏡国際会議 (XRM2005) 報告】

筑波大学数理物質科学研究科 青木貞雄

表記国際会議が今年7月26日から30日の日程で、イーグレひめじ（姫路市）で開催されました。これまでの会議開催地はヨーロッパとアメリカ合衆国に限られていましたが、今回初めて、アジア地域での開催になりました。主催はSPring-8、兵庫県立大学と姫路市が共催でした。詳しいプログラムやアブストラクトは本会議の公式ホームページ <http://xrm2005.spring8.or.jp> にありますので御覧になって下さい。

今回は日本人の参加者も増え、国内外併せて過去最高の262人に達しました。学術講演は、招待講演23件、口頭発表35件、ポスター発表168件でした。企業展示は、展示ブース数10、参加企業数は15社でした。

主なトピックスとして、「光学素子開発」では、軟X線領域のゾーンプレート結像顕微鏡で15nmの分解能、硬X線領域でも結像顕微鏡とマイクロビームの両方で30nm前後の空間分解能が報告されました。光学素子もFZP、全反射ミラー、屈折レンズといったあらゆる光学系で100nm以下の空間分解能が達成されています。「応用」では、生体観察が凍結法の導入で実用レベルに達していました。加えて、材料科学や物性（特に強磁性体、強誘電体、量子デバイス等）への応用が目につきました。これは結像型の光電子顕微鏡の進歩や利用X線のエネルギー領域の広がりなどにも関係しており、従来の軟X線から、硬X線（10 keV以上）への比重が大きくなってきています。「3次元、4次元計測」では、CTに代表される3次元計測がX線顕微鏡でも一般的になりつつあり、これに時間軸を加えた4次元測定も行われるようになって来ました。物質の相転移や材料科学での破壊、変形等の観察が行われ、2次元イメージングではナノ秒以下の高速現象の観察（例えば磁壁の移動の観察等）も行われています。

本会議のプロシーディングは国内の物理系学術誌刊行会協会 (IPAP) から conference proceeding seriesとして2006年初頭出版予定です。次回のXRM2008は、Swiss Light Source主催で2008年にZurichで開催されることになりました。

尚、本研究会の会員を初め、多くの方々のご協力によって、会議が無事に終了しましたことを心より感謝致します。



X-RAY  
IMAGING OPTICS



編集部より

本ニュースレターについてのご意見・ご要望がございましたら、メールにて編集部 田原 (tawara@u.phys.nagoya-u.ac.jp) まで御連絡下さい。また、本ニュースレターは電子メール（容量1MB程度）での配信も可能です。ご希望の方は、ご所属（機関名、企業名等）、氏名、配信先電子メールアドレス、印刷版の要・不要を明記の上、メールにて上記田原まで御連絡下さい。

X線結像光学ニュースレター  
No.22 (2005年9月)

発行 X線結像光学研究会  
(代表 筑波大学物理工学系 青木貞雄)  
編集部 名古屋大学エコトピア科学研究所 田原 謙  
(協力研究室：大学院理学研究科物理学教室U研)  
〒464-8602 名古屋市千種区不老町  
TEL: 052-789-2917, FAX: 052-789-2919  
E-mail: tawara@u.phys.nagoya-u.ac.jp