

# ユーザーとスタッフの広場

## ◇ユーザー受賞記事

### 平成 19 年度日本化学会進歩賞を 2 名の PF ユーザーの若手研究者が受賞

日本化学会の平成 19 年度各賞受賞者が発表されました。化学の基礎または応用に関する優秀な研究業績を挙げた若手研究者に対して贈られる進歩賞を、2 名の PF ユーザーの若手研究者が受賞されました。受賞対象となった研究成果はいずれも PF で行われた研究です。

#### 鈴木 秀士氏 (北海道大学触媒化学研究センター)

元素分析走査プローブ顕微鏡の開発

Development of Surface Elemental Analysis Technique Based on the Scanning Probe Microscopy

鈴木氏は、これまで走査プローブ顕微鏡 (SPM) を用いた表面研究で活躍されていましたが、原理的に元素種や化学状態を同定することができない SPM では表面化学プロセスの解明のためには限界があると考え、SPM のひとつである非接触原子間力顕微鏡 (NC-AFM) と、放射光 X 線を組み合わせた新しい原理に基づく顕微鏡 X-ray Aided Noncontact Atomic Force Microscopy (XANAM) を提案しました。これは、NC-AFM の探針先端と表面との相互作用が、元素の吸収端付近の X 線により変化することを利用して、元素種や化学状態を識別しようとするものです。鈴木氏は、この原理を実証するために自作の装置を PF に持ち込んで検証実験を行いました。探針と表面の間のわずかな引力を検出するために、装置の改良や注意深い測定を繰り返し、吸収端付近の特定のエネルギーで引力相互作用が急激に変わる新奇な現象を捉えることに成功しました。このような X 線による原子間力の制御という現象を検出したのは、鈴木氏が世界で初めて実現したものです。この技術は、これまで難しかった固体表面上の元素種や化学種がナノレベルで直接に識別できる画期的な手法として期待されています。

#### 唯 美津木氏 (東京大学大学院理学系研究科)

選択触媒機能創出を目指した表面を媒体とする高活性金属錯体の構築と反応機構の解明

Surface-Mediated Design and Catalytic Properties of Active Metal Complexes for Advanced Catalysis Creation

唯氏は、不均一系固体触媒表面において、触媒活性構造と選択的反応場を自由に設計できる複数の表面設計手法を考案し、多くの高活性の新規触媒の設計に成功しました。特に、工業的にも重要であり、最も難しい化学反応のひとつとされてきたベンゼンと酸素からのフェノール直接合成を触媒するレニウムクラスター触媒において、ベンゼン転

化率 9.9%、フェノール選択性 94% というこれまでの触媒性能をはるかに超える性能を実現しています。PF で行われた XAFS 実験によって、この触媒はアンモニア存在下で、中心に窒素を持つレニウム 10 核クラスターという全く新規の構造を取ることが明らかにされました。また、触媒の実際の反応過程における構造の動的変化を捉えるために、*in-situ* 時間分解 XAFS 法の開発・改良を行い、上記のフェノール合成触媒や、燃料電池触媒などのダイナミックな挙動を分子レベルで解明することに成功しました。唯氏の研究成果は、高活性触媒設計に対して学術面でも応用面でも大きなインパクトを与えています。

### 八島正知氏 (東京工業大学) が日本金属学会功績賞を受賞されました

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・材料物理科学専攻・准教授の八島正知 (やしま まさと) 氏が、日本金属学会第 66 回功績賞 (工業材料部門) を受賞されました。この賞は、「金属学または金属工業技術の進歩発達に寄与する有益な論文を発表し、かつ将来を約束されるような新進気鋭の研究者、技術者であって、工業技術部門については満 45 歳以内の金属学会会員」に授与されるものです。

今回の受賞は、「高温での構造物性の開拓」に関する業績が高く評価されたものです。八島氏は空气中 1600°C 程度までの高温に試料を保持して、高分解能放射光粉末回折測定および中性子回折測定を行い、精密結晶構造解析を可能にする、新しい加熱システムをいくつか開発しました。その中には PF の BL-4B2 や BL-6C の回折計に設置できる試料加熱装置も含まれています。これら開発した加熱装置を活用することによって、同氏は、種々の高速イオン伝導体における可動イオンの拡散経路と不規則構造、および種々の材料における化学結合を可視化することに成功しています。また、電子材料、構造材料、環境・エネルギー材料、触媒等の結晶構造、相転移機構および電子密度を明らかにしています。

受賞対象となった研究成果のいくつかは PF の BL-6C や BL-4B2 における実験と装置開発によるものであり、PF での放射光利用研究が工業材料分野および材料科学工学分野に大きく貢献していることが、金属学会においても高く評価されました。

贈呈式は、2008 年 3 月 26 日に日本金属学会 2008 年春期 (第 142 回) 大会 (武蔵工業大学世田谷キャンパス) において行なわれました。



贈呈式にて

## 彦坂泰正氏 (分子科学研究所) が 日本物理学会若手奨励賞を受賞されました

自然科学研究機構分子科学研究所の彦坂泰正(ひこさか・やすまさ)氏が、第2回(2008年)日本物理学会若手奨励賞を受賞されました。今回の受賞は、同氏がフロンファクトリーで行った「多重同時計測による原子分子の光多重電離過程の研究」が対象になっています。

彦坂氏は、放出電子間の運動エネルギー相関を高効率かつ精度良く測定出来る実験手法として、磁気ボトル型電子エネルギー分析を原子や分子の光多重電離の研究に導入することにより、次々と特筆すべき研究成果を報告しています。原子や分子の内殻電子を光電離すると外殻電子がshake-offされて同時に飛び出てくることが知られていますが、彦坂氏はNe原子においてこの過程を直接的に観測することに初めて成功しました。ここでは、このshake-off過程で生成する二価イオン状態の分岐比が、従来の理論では説明できないことを指摘しました。また、通常では生成断面積が小さい内殻軌道からの二重電離をXe原子において観測し、その生成過程に関する30年前の理論的予測が正しかったことを実験的に初めて証明しました。

以上のように、従来の光電子分光では観測できなかった原子分子の多重電離過程について、多電子同時計測を用いることにより飛躍的にその理解を発展させたことが高く評価され、今回の受賞となりました。

授賞式および受賞講演は2008年3月23日-26日に近畿大学で行われた日本物理学会第63回年次大会で行われました。



授賞式(上)と受賞講演(下)にて

## 尾嶋正治教授(東京大学)が表面科学学会 会賞を受賞されました

東京大学・大学院工学系研究科・応用化学専攻の尾嶋正治(おしま まさはる)教授が、第12回表面科学学会会賞を受賞されました。この賞は、「表面科学の発展に、または、本学会の発展に、特に顕著な貢献があったと認められる個人会員」に授与されるものです。

今回の受賞は、「高輝度放射光を用いた半導体・磁性体の表面電子状態の研究」に関する業績が高く評価されたものです。尾嶋教授の業績は多岐にわたりますが、今回の受賞理由となった業績を簡単にまとめると以下の4項目になります。

1. 放射光軟X線を用いた化合物半導体表面の電子状態、表面構造解析。
2. 化合物半導体の安定化表面を活用したInAs, MnAs, MnSb ナノ結晶の低温MBE成長法確立、および*in situ*放射光光電子分光を用いた磁性ナノ結晶の電子状態解析。
3. レーザーMBE装置と光電子分光を結合させた*in situ*システムを初めて開発し、超巨大磁気抵抗効果CMRを示す $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 薄膜の電子状態を角度分解光電子分光、共鳴光電子分光で初めて解明。
4. LSI用ゲート絶縁膜の解析において絶縁膜/Si基板界面バンド不連続性の精密決定法開発、および角度分解光電子分光による深さ方向分布決定法の開発、放射光の産業使用推進。

これらの業績はPFのNTTビームライン(旧BL-1), BL-1C, BL-2Cにおける実験と装置開発とが中心となっており、PFでの放射光利用研究が表面科学の分野に大きく貢献していることが、表面科学学会においても高く評価されました。

授賞式は2008年5月10日(土)表面科学学会総会(東京大学)にて行われました。



研究室にて



## SSRL 滞在記

Stanford University 山本 達

本稿では筆者 [1] が 2005 年 4 月より博士研究員として滞在している Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL) [2] について紹介させていただきます。このユーザーとスタッフの広場の海外滞在記は、私が学生時代（東京大学物性研究所吉信淳研究室）に PF でのビームタイム (BL-16B, BL-9A, BL-7A) の合間に楽しく読ませて頂いた事を覚えています。海外での研究生活について雰囲気を感じて頂ければ幸いです。

SSRL は、米国カリフォルニア州サンフランシスコとサンノゼの中間のシリコンバレーと呼ばれる地域にあります (Fig. 1)。SSRL は素粒子物理学研究施設である Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)[3] に所属する一組織で、SSRL/SLAC はアメリカエネルギー省 (Department of Energy; DOE) 所轄の国立研究所ですが運営は私立大学の Stanford University が行うという形を取っています。そのため SSRL/SLAC の Faculty は Stanford University の Faculty を兼任する事が多く、ほとんどの学生は Stanford University に所属しています。歴史的には、SSRL は 1973 年に素粒子物理学研究用として建設された加速器 Stanford Positron Electron Asymmetric Ring (SPEAR) から得られる放射光を寄生的に利用する第一世代放射光施設として始まりました。そのためか現在でも SSRL は第一世代放射光施設として分類されていることがあるのですが、実際にはこれまでに数々の改造が加えられ現在では放射光専用蓄積リング SPEAR3 を利用した低エミッタンスかつ高輝度の第三世代放射光施設になっています。SSRL の蓄積リングは周長 234 m で PF (187 m) とほぼ同じ大きさなので、同規模の放射光施設を想像して頂ければよいかと思います。ただ SSRL の建物は増築を繰り返しているために複雑で、自分が普段使っていない beamline に行こうとすると迷子になることもしばしばです。SSRL の運転は電子エネルギー 3.0 GeV, エミッタンス 9.75 nrad, 蓄積電流 100 mA (1 日 3 回入射) にて行われ、12 本の beamline (偏向電磁石 3

本, ウィグラー 6 本, アンジュレーター 3 本) に約 30 の実験ステーションが設置され、VUV ~ 軟 X 線 ~ 硬 X 線領域に渡る幅広い波長の放射光を用いた実験が行われています。今後、蓄積電流 500 mA での運転や Top-off 運転が計画されています。またベイエリア (サンフランシスコ湾の湾岸一帯を指す) では、SSRL から車で一時間ほど行ったパークリーにも第三世代放射光施設である Advanced Light Source (ALS) [4] があるため (Fig.1), 私を含め両方の施設で実験を行っている研究者が多いようです。そして忘れてはいけませんが、SLAC では世界最長 2 miles (3.2 km) の線形加速器の一部を使い世界初の硬 X 線領域 (1.5~15 Å) での X 線自由電子レーザー (X-ray Free Electron Laser; XFEL) を得る Linac Coherent Light Source (LCLS) 計画 [5] が進んでおり、2009 年には稼働予定です。XFEL 光源の高輝度・高干渉性・短パルス性等のユニークな性質を活かしたタンパク質の一分子構造解析や時間分解測定を初めとした新たな実験が現在熱く議論されています。

さてここでベイエリアでの生活について紹介したいと思います。まず何より気候の良さが挙げられます。11 月から 3 月までは少し雨が降りますが、それ以外の半年間に雨を見ることはまずありません。特に SSRL のあるシリコンバレーは、霧の多いサンフランシスコやパークリーと比べて天候が良いです。この気候のせい、シリコンバレーには Google, Yahoo!, Cisco, Oracle 等の IT 企業の本社が数多く集まっています。また SSRL に面している Sand Hill Road は、ベンチャー企業への投資を専門とする金融機関 (Venture Capital) が集まり巨額のお金が動いていることで有名です。ところでこの Sand Hill Road は片側 2~3 車線の直線の道路で、私は筑波の学園大通りを思い出しました。ベイエリアは人口の約 3 割をアジア系が占めている全米でも特殊な場所で、自分が外国人であることを感じる事は少ないです。日系スーパーマーケットや日本食レストランも数多くあり、外国で生活するにはとても楽な場所だと思います。また自然が豊かで、近くには多くの hiking course があり、週末などに少し足を伸ばせば太平洋側の海辺や Yosemite 国立公園やスキーの名所の Lake Tahoe 等に行くことができます。SSRL も自然に囲まれており、夜になると鹿、タヌキ、フクロウ、スカンク (!) 等様々な野生動物を見ることができます。敢えてベイエリアの問題点を挙げるとすると、アパートの家賃の高さでしょうか。元々家賃の高い場所なのですが、最近の低所得者向け (サブプライム) 住宅ローンの問題で更に値上がりし、1 Bed room で月 \$1,300 (約 13 万円) 以上払わないとアパートが見つかりません。あと個人的には、どこへ行くのにも車なのでなかなかお酒を飲めないのも残念です。

私が所属している SSRL の Anders Nilsson 教授のグループ [6] は、Nilsson 教授とスタッフが 3 人、ポスドクが私を含め 6 人、大学院生が 5 人の計 14 名のグループです (Fig. 2)。面白いことに、この内アメリカ人は大学院生の 1 人だけで、後はスウェーデン、ドイツ、ロシア、トルコ、トルクメニスタン、カナダ、インドネシア、中国、日本と多

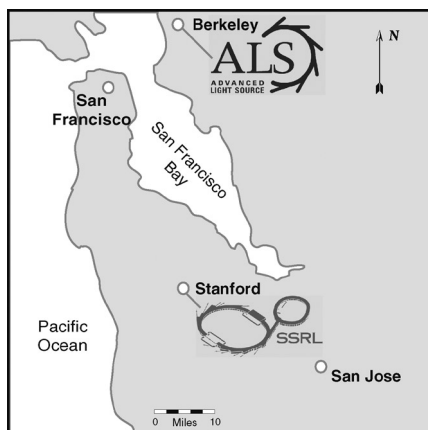


Figure 1 SSRL のあるベイエリアの地図



**Figure 2** SSRL 近くの公園にハイキングに行った際の Nilsson 研究室の皆との集合写真。前列左端が筆者、その右隣が Nilsson 教授です。私の膝の上にいるのは同僚の子供です。

国籍です。そのためか、アメリカの祝日に休みだということをおぼろげに忘れて研究室に来てしまう人が多いのは困ったものです。Nilsson グループでは、光電子分光法 (PES)・X線吸収分光法 (XAS)・X線発光分光法 (XES) を初めとした様々な X線分光法を用いて、固体表面や溶液中の分子（特に、水分子）の化学結合を解明する研究が行われています。私自身は特に、大気圧に近い (~1 Torr) 気体雰囲気下での金属・酸化物表面における水の吸着状態及び反応について大気圧光電子分光法 Ambient Pressure PES (AP-PES) を用いた研究を進めています [7,8]。触媒反応や環境中で重要な化学反応の多くは気体雰囲気下でおきているため、それらの反応を理解するためには実際の反応条件下での *in-situ* 測定が求められます。従来の光電子分光法は真空中での測定に限られていましたが、AP-PES では差動排気された電子分光器の近くに試料を置くことで、気体による光電子の減衰を最小限に抑え、気体雰囲気下での PES 測定を可能にしています。AP-PES を用いた実験はこれまで ALS Beamline11.0.2 で行ってきましたが、SSRL でも Nilsson グループの小笠原寛人さんを中心としてより大気圧に近い圧力での実験を目指した AP-PES が建設中です。AP-PES について興味のある方は、文末の文献 [9,10] をご覧ください。

海外での研究は周りの人の支えがないとできないと思います。私の正に mentor として様々な助言を頂いた Nilsson 教授、研究・生活の両方でお世話になった小笠原さん、そして全て名前を挙げることはできませんが滞在中に知り合った皆様に感謝し、またこの文が SSRL に興味を持って頂くきっかけになればと願いつつ、筆を置きたいと思います。

#### References

- [1] [http://www-ssrl.slac.stanford.edu/~susumu/susumu\\_index.html](http://www-ssrl.slac.stanford.edu/~susumu/susumu_index.html)  
 [2] <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/>

- [3] <http://www.slac.stanford.edu/>  
 [4] <http://www-als.lbl.gov/als/>  
 [5] <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/index.html>; LCLS 計画についての詳細は <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/cdr/> の Conceptual Design Report をご覧ください。  
 [6] <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/nilssongroup/>  
 [7] S. Yamamoto *et al.*, "Hydroxyl-induced wetting of metals by water at near ambient conditions", *J. Phys. Chem. C (Letters)*, 111, 7848-7850 (2007).  
 [8] S. Yamamoto *et al.*, "In-situ x-ray photoelectron spectroscopy studies of water on metals and oxides at ambient conditions", *J. Phys.: Condens. Matter*, in press (2008).  
 [9] D. F. Ogletree *et al.*, "A differentially pumped electrostatic lens system for photoemission studies in the millibar range", *Review of Scientific Instruments*, 73, 3872-3877 (2002).  
 [10] M. Salmeron and R. Schlögl, "Ambient pressure photoelectron spectroscopy: A new tool for surface science and nanotechnology", *Surf. Sci. Rep.*, in press (2008).

## ビームラインのできるまで ～ BL-16A 立ち上げ奮闘記 (1) ～

放射光科学第一研究系 雨宮健太

### 1. はじめに

現在 PF では BL-16A の立ち上げを鋭意行っており、その状況については PF シンポジウム等で逐次報告をしています。しかし、わずか 10 分程度の発表や、PF ニュースの 1 ページ程度の記事では、実際の立ち上げがどのように行われていて、現場で何が起きているのかを伝えるはできません。したがって、ユーザーのみならず、あるいは PF のスタッフでさえも、「BL-16A の立ち上げっていったい何をしているんだろう？」と思っている方が少なくないかと思えます。今回この記事を書こうと思いついたのは、「公式発表」では決して表に出ない、実際の立ち上げの現場で起こる様々な出来事をお伝えし、ビームライン立ち上げの面白さ、奥深さとともに現場の緊迫感を感じ取って頂きたいと考えたからです。

なお、ビームラインの建設は、設計から始まって、旧ラインの撤去、測量、コンポーネントの設置、ベーキング、インターロック設置、などと続いていきますが、今回は光を通すところからのお話をしたいと思います。それ以前の現場作業に関しては、夏休みも返上で朝から晩まで現場を取り仕切ってくださった豊島さんに水を向ければ、一晩かけても語りつくせないほどの苦勞話、笑い話、そして背筋が寒くなる話を、嬉々として話して下さると思いますので、興味のある方は是非声をかけてみてください。

## 2. 緊迫の光導入 (10/29)

「光導入試験」というのは、ビームラインに最初に光を入れる、つまり MBS, BBS を開ける儀式です。なにしろ最初ですから、放射光が全く出てこない可能性も十分にあるのです。もちろんそういうことがないように綿密な測定をしているわけですが、残念ながら過去にそういった例は何度もあるわけで、まさに緊張の一瞬です。特に今回は、無理を言って普通のユーザー運転中のマシンスタディの日を使わせて頂いている上に、通常なら 9:00 からの光導入が 17:00 からでしたので、失敗が許されないという意味からも緊張感が否が応でも高まりました（ちなみに光導入試験は「ビームライン検査委員会」の、そうそうたるメンバー立会いのもとで行われます）。しかも直前にモーターのトラブルで、アンジュレータ光を切り出すためのマスク（図 1 参照）があらぬ場所に動いてしまい、そこからなかなか戻ってこない、というおまけまでついて、まったくもって心臓に悪い日でした（結局始められたのは 18:00 でした）。

いざ光を出してみると、即座に入射スリット (S1) 位置やその下流の蛍光板で光を見ることができ、アンジュレータのギャップを閉めると光の中心あたりが強くなっていく（ような気がする）、ということで、光導入試験は無事合格となり、検査委員会の皆さんも三々五々帰って行きました。光源系の皆さんもちらほらと冷やかに来たりして、一転なごやかな雰囲気です。ここからは「光焼き出し」といって、今まで光を当てたことのないミラーからの脱ガスがおさまるのを待ちながら、少しずつリングの蓄積電流値を上げたり、アンジュレータのギャップを閉めたりする段階に入ります。順調に進んでいるかと思われた光焼き出しですが、しばらくして豊島さんが首をひねりながら言うには、「マスクの真空度よりも M0 の方が悪いのがどうも気になる。」「これって（光の一部が）ミラーに当たらないで後ろに抜けてんじゃないの？」とのこと。つまり、大部分の熱はマスクが受け止めているはずなのに M0 チャンバーの真空度の方が悪いのは、光の一部がチェンバーの内壁に当たっているからではないかという予測です。ということでメインハッチをあけてチェンバーを触ってみたところ、ホントに熱くなっていました。いやはや、油断大敵です。

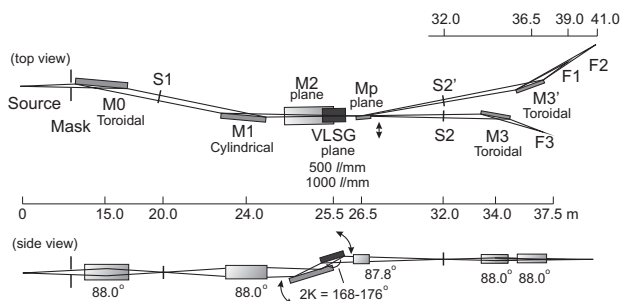


図 1 新 BL-16A のレイアウト。

## 3. 迷走の芯探し (11/6-9)

光焼き出しが進んで真空度が落ち着いてきたところで、いよいよビームラインの調整に入ります。アンジュレータの場合に特に重要なのは、「アンジュレータ光の芯を見つけて、それをビームラインに導くこと」です。アンジュレータ光の周りにはベンディング光のような余計な光がうようよしていますので、それに騙されると大幅なタイムロスになります。今回これを効率よく行うために、マスクのすぐ下流に「ワイヤーモニター」なるものを仕込んでありました。これは単純に、縦横に張った 0.1 mm のワイヤーからの光電流を測定し、それでビームのプロファイルを見ようというものです。早速それで測定してみると…、なにでもない！ 水平方向に 5 mm 以上にわたって強度が一定で、ピークが何も見えないのです。そんなブロードなアンジュレータ光なんてあり得ません。さらに垂直方向に至っては、ホントに何も無い、つまり信号が全く来ないということで、またまたハッチをあけてのぞいてみるとワイヤーが切れていました。アンジュレータのパワー、恐るべしです。

そんなわけで、お手軽な方法はあきらめて次の作戦に移りました。つまり、ビームラインは光さえ通ればある程度は分光ができるので、とにかくアンジュレータスペクトルを測ってみます。そして、ビームラインの途中にあるアパーチャーを使って、例えば右半分のみを通した場合と左半分の場合でスペクトルを比べます（図 2(a)）。するとこの例では明らかに左半分の方がピークが鋭い、ということでマスクを左に動かします。すると図 2(b) のように、「さっきまでの光なんてアンジュレータ光とは呼べない」と思えるくらいに鋭いピークが出ました。このようにして決めたマスク位置は、なんと垂直、水平ともに 0.0 mm（最初に置いた位置）であり、光源と測定の精度の高さに驚いたものです。

ところで、なぜワイヤーモニターではうまく芯が見つけれなかったのか、その理由はまだよく理解できていません。一つのポイントはワイヤーモニターは白色光を見ていることだとは思いますが、まだまだ奥が深いですね。

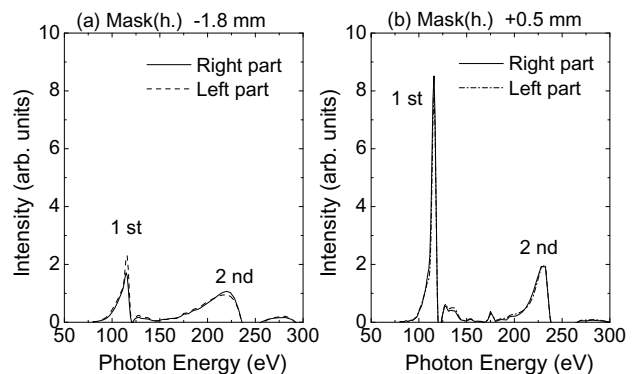


図 2 マスク位置を変えて測定したアンジュレータスペクトル。



#### 4. 快調な M0 調整 (11/9)

さて、アンジュレータ光の芯さえ決まればこちらのもの、それに合わせてビームラインを調整すればいいわけです。ただし、誤解してはいけないのは、「測量した通りにビームを導くことが調整のゴールではない」ということです。というのは、多くの場合ミラーには「集光」という役割があり、そのためのミラーはある曲率半径をもっています。ところが曲率半径には必ず誤差があり、そうすると測量通りにビームを導いても狙った所（たとえばスリット）にフォーカスしません。もちろんベント機構がついたミラーなら曲率半径を変えられますが、たくさんあるミラーにそんな贅沢な機構はつけられません（しかも軟X線のラインなので超高真空仕様にしなないとイケない!）。そういう場合には、あえて入射角をずらしてフォーカス条件を変えることで、望みの位置に焦点を合わせないとイケません。

ではどうしたら焦点の位置を知ることができるのでしょうか？ これは一般にはそう簡単ではないのですが、実は私が 10 年前から使っている秘密の方法があります。まず、図 3 に示すようにビームラインの適当な場所（ミラーの上流でも下流でもどこでも OK）にアパーチャーを用意します。例えば図 3(a) で上のアパーチャーを閉めると破線の光だけが下流に届き、逆に下を閉めれば実線の光だけが見られます。今、スリットの位置に焦点を合わせたいとしましょう。ところが図 3(a) のように焦点が下流にあると、実線の光と破線の光はスリット位置で上下にずれています。したがって、ミラーを振りながらスリットの下流で光強度を見てみると、実線の光と破線の光とはスリットを抜ける時のミラーの角度が違います（右の図）。逆に図 3(b) のように焦点が上流にあれば、このずれ方は逆になりますし、ちょうど焦点が合った時には、ずれがなくなります。この方法を使えば、焦点がスリットの上流にあるのか下流にあるのか、そしてそれがどれくらい離れているのかが簡単にわかるのです。

ということで早速、この方法を使って M0 の調整をしました（図 4）。このミラーの最大の使命は、光を入射ス

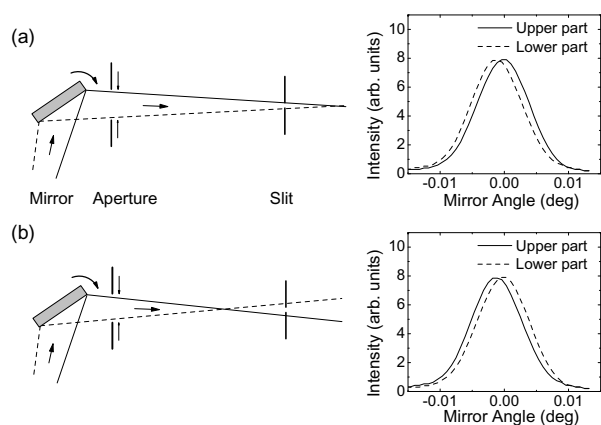


図 3 焦点位置の探し方の模式図。焦点がスリットの下流にある場合 (a) と上流にある場合 (b)。

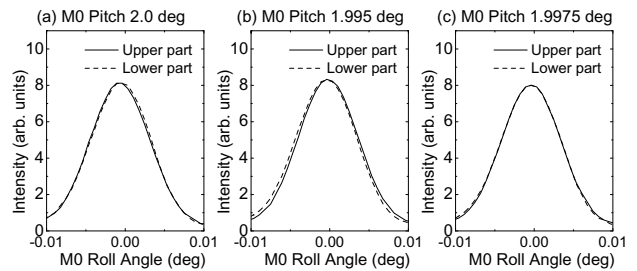


図 4 M0 の入射角 (pitch) の調整。S1 下流で光強度を測定。

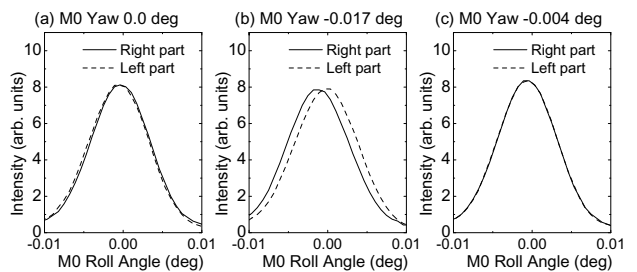


図 5 M0 の面内回転 (yaw) の調整。S1 下流で光強度を測定。

リット (S1) に正しく集光することです。そこで S1 下流で光強度を見ながらミラーを振ってみると、図 4(a) のように上の方の光と下の方の光とで、わずかにピークがずれています（焦点が上流にある）。実はこの程度合っていれば実質的に問題ないのですが、せっかくなのでミラーの入射角 (pitch) をわずかに変えてみると、図 4(b) のように今度は二つのピークは逆にずれ、焦点が S1 の下流に移動したことがわかります。そしてこの二つのデータから、最適な入射角を決めて最後に測定したのが図 4(c) で、これで調整完了です。

ところが焦点が S1 に合っているだけでは不十分です。というのは、ここでの光は縦方向には集光されていても横方向には広がっているもので、もしもその横長の光が傾いていると、スリットの開口とうまく合わなくて光をロスしてしまいます。そこで今度は横からのアパーチャーで右側や左側の光を切り出し、同じようにミラーを振って光強度を測定したのが図 5(a) です。このデータは、右側の光と左側の光がスリットに対して同じ高さでない、つまり傾いていることを示しています。これを直すには M0 の面内回転 (yaw) を調整すればよいのですが、これも図 5(a) → (b) → (c) の 3 回で完了しました。

このように M0 の調整は極めて順調に進み、記録によると 17:21 にスタートして 18:49 には pitch と yaw の調整が完了しています。この調子でいけば、来週には分光器の調整も全部終わるだろうと、誰もが思った金曜日でした。しかし翌週、その期待は粉々に打ち砕かれるのでした。

#### 5. 疑心暗鬼の M1 調整 (11/13-27)

さて問題の M1 です。このミラーの使命は入射スリットからの光を縦方向に集光し、出射スリット (S2) の 90 mm 上流に向かってフォーカスさせることです（これは分光器の設計上の都合で、こうしておくとお実際に使う回折光がチ

ようど S2 のあたりにフォーカスされます [1])。これを確かめるためには、いわゆる「0 次光」を使います。回折格子は、入射角と出射角が等しい条件では全ての波長の光を反射し、要するに単なるミラーになり下がります。幸いなことにこの分光器の回折格子 (VLSG) は平面で、M2 (後述) も平面ですから、M1 によって反射された光は、0 次光条件下では何ら邪魔されることなく、S2 の 90 mm 上流にフォーカスされるはずで、そう、「はず」なのです。

さてこの「90 mm 上流」をどうやって確かめるか、それも若干やっかいな話です。というのは S2 は ± 50 mm しか前後に動かないので、「90 mm 上流」に S2 を動かして上記と同じような調整をすることができないのです。まさにここで、この調整方法の利点、「どれだけ焦点からずれているかがわかる」が生きてきます。つまり、S2 を 45 mm 上流にした場合と設計位置 (0 mm) に置いた場合とでは、上の光と下の光とのピーク位置のずれ方がちょうど 1:2 になるべきで、逆にそうなるように M1 を調整すればいいのです。

まずは M1 を設計通りの角度にして測定したのが図 6(a) です。S2 を設計位置 (0 mm) にしたときにピークが一致しないのは予想通りで (なにしろ焦点は 90 mm 上流ですので)、S2 を 45 mm 上流にしたとき (-45 mm と表記) に、このずれが半分になればいいのです。が…、ご覧の通り、ほとんど変わりません。まあでも、いずれにしても焦点

は上流にあるんだから、ということで M1 の入射角 (pitch) を 1.98 度してみたのが図 6(b) です。確かに 2 つのピークの差は縮まりましたし、-45 mm の方が差は小さいように見えますが、まだまだ半分ではないですね。実はこれは大問題で、入射角 2.0 度と 1.98 度の違いは曲率半径にして 1% の違いに相当するのですが、このミラーの仕様上の許容誤差がまさに 1% なのです (しかもメーカーの検査結果では、ずれは 0.3% となっていました)。こうなるとまさに疑心暗鬼です。通常、この程度の曲率半径 (185 mm) で 1% の誤差が生じることは、まずあり得ませんし、検査結果もそれを示しています。「10 年来使ってきたこの調整方法は実は間違いなのか?」「測量を間違ったんじゃないか?」などなど、疑い出したら切りがありません。

結局さらに入射角を浅くし、目標の位置に焦点が来た時のデータが図 6(c) ですが、ミラーの角度はついに 1.9635 度となり、素直に解釈すれば曲率半径が設計値から 2% 近くもずれているという、信じられない結論となりました。ところで簡単に 1.9635 度と書いていますが、実はこの角度ではビームが元のラインから大きく横にずれますので、下流のミラー等を動かさないといけません。せっかく 0.1 mm の精度で設置してもらったビームラインですが、光が通らないうと意味がないので、泣く泣くねじを緩めてベローズを激しくねじりながらチェンバーを横にずらしました。「測量した通りにビームを導くことが調整のゴールではない」のです。

### 6. 混迷の回折光調整 (11/27-12/6)

なにとはともあれ M1 の調整は完了して設計通りの集光が得られたので、あとは実際に使う回折光の焦点が S2 に合うことを確認するだけです。ちなみにこの分光器は「可変偏角」という機構がポイントです。これは図 1 に示した 2K という値、つまり回折格子への入射光と回折光のなす角 (これを偏角と呼びます) をある程度自由に変えることで、広いエネルギー範囲で高い性能を保つことができます [1]。なお、この機構は平面鏡 M2 が担っています。一方、回折光の焦点位置は同じエネルギーでも「偏角」によって少し変わりますので、高分解能を実現するためには、各エネルギーにおいて回折光の焦点が S2 にぴったり合うような偏角を探す必要があります。一例として、これまでと同じ方法で Ar の 2p 吸収ピークを使って焦点位置を調べたのが図 7 です。偏角 (2K)=174 度 (a) では、S2 を精一杯上流にしてもまだ実線と破線の間でピークのシフトが残りますが、2K=172 度 (b) では S2 を設計位置 (0 mm) にしたときに 2 つのピークが一致し、ちょうど焦点が合っていることがわかります。こうしたシフト量をまとめたのが図 7(c) ですが、偏角によって焦点が変化していく様子がよくわかります。

さて、これでめでたしめでたし、かと思うと、そう簡単には許してもらえません。図 8(a) は焦点が S2 にちょうど合うときの偏角をエネルギーに対してプロットしたのですが、計算値 (実線) と実測値で 2 度程度の違いがあり

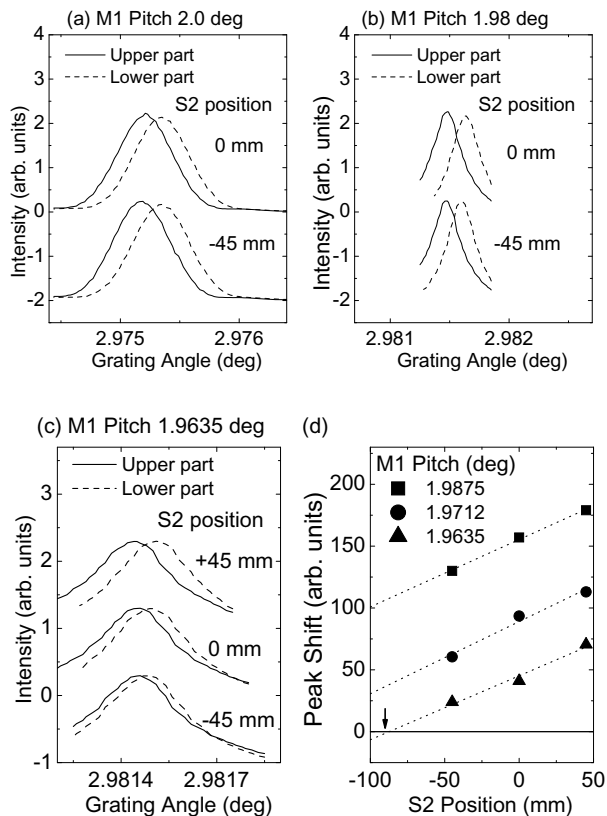


図 6 M1 の入射角 (pitch) の調整。S2 下流で光強度を測定。(d) はいくつかの M1 入射角について実線と破線の間でのピークのシフト量をプロットしたもので、シフト量がゼロになるときに焦点に相当する (矢印)。

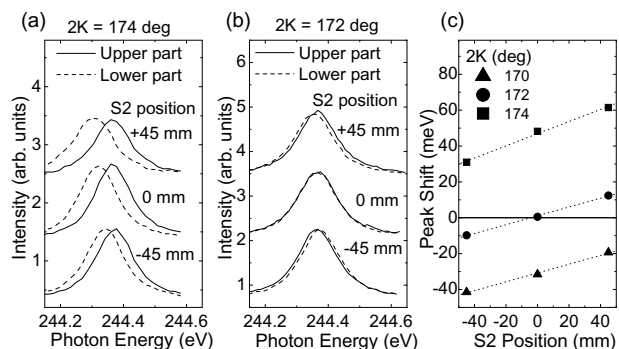


図7 Ar 2p 吸収ピークによる焦点位置の調整。(C) はそれぞれの偏角 (2k) における実線と破線の間のピークシフトをプロットしたもの。

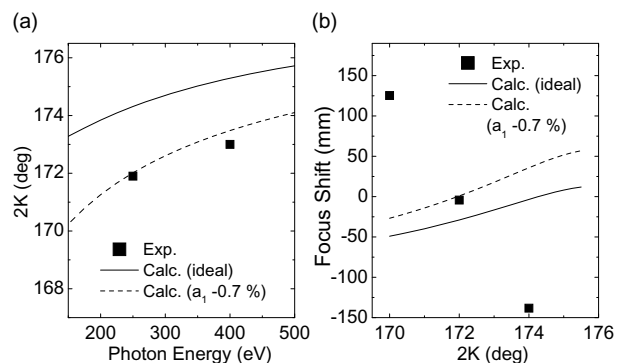


図8 (a) 焦点が出射スリットに合うような偏角 (2K) のプロットおよび、(b) Ar 2p 吸収ピークにおける焦点位置の偏角依存性。

ます。いくら可変偏角だからうまく調整すれば焦点を合わせられるといっても、予定と2度も違っていたら回折効率が大幅に落ちてしまい、強度の面で大きく損をさせていただきます。なぜこんなにずれてしまったのでしょうか？ 上述のように M1 は正しく調整されていますので、単純に考えれば残る問題は回折格子の出来ということになります。この分光器は刻線密度が場所によって徐々に変わる、特殊な回折格子 (VLSG) を用いており、それを利用して焦点位置をうまく合わせています [1]。そこで、その「刻線密度の変え方」の度合い (ここでは  $a_1$  と呼びます) が、0.7% 違っていると仮定すると、点線のように実験値をほぼ再現できることがわかります。

ところがこれでもまだ終わりません。図 8(b) は偏角を変えたときに焦点の位置がどう変わるかをプロットしたものです。これは図 7(c) のデータを内挿あるいは外挿すれば求めることができます。さてこれを設計値 (実線) と比べると、まったく違っていることがわかります。第一、計算値と実測値では傾きが逆です。上述のように、 $a_1$  の誤差を仮定すれば 2K=172 度付近で焦点が合うことは説明ができるのですが、傾きについてはまったく理解不能です。実はこの傾向、もちろん調整中から気付いてはいたのですが、「符号を逆に表示しちゃったかな」と好意的に解釈して、見なかったことにしていました。しかしその後、他のデータを検証したり、計算式を見直したりした結果、どうやら

これは本当らしいという結論に達しました。

さあ、この混迷の状況はいったい何が原因なのでしょう？ 実は私も皆目見当がつかなかったのですが、正月休みに車を運転しながら、ある可能性に思い至りました。結果的にそれは 2008 年の調整で確認され、3 月に対策を施したのですが、これについては読者のみなさんへの宿題ということで、次回にしたいと思います。

### 7. 第一回目のおわりに

今回の記事で、ビームライン立ち上げの実情 (の一例) を少しでも知っていただければ幸いです。わかりにくいこと、もっと知りたいことなどがありましたらお知らせいただければ、第二回に反映させたいと思いますのでよろしくお願いします。なお、このビームラインは約 10 年前の構想段階から実際の建設や調整に至るまで、多くの人々の力で作られたものであり、今回紹介したのはそのほんの一部であることを申し添えます。

[1] K. Amemiya and T. Ohta, J. Synchrotron Rad. 11 (2004) 171.

## PF トピックス一覧 (1 月～3 月)

2002 年より KEK ではホームページで「News@KEK」と題して最新の研究成果やプレスリリースなどを紹介しています (KEK のトップページ <http://www.kek.jp/ja/index.html> に掲載。毎週木曜日に更新)。それをうけて、PF のホームページでも News@KEK で取り上げられたものはもとより、PF の施設を利用して書かれた論文の紹介や受賞記事等を掲載しており、一部は既に PF ニュースでも取り上げられています。各トピックスの詳細は「これまでのトピックス」(<http://pfwww.kek.jp/topics/index.html>) をご覧ください。

- 2008 年 1 月～3 月に紹介された PF トピックス一覧
- 2008.01.21 結晶基板からの巨大圧力により揃う電子軌道～マンガン酸化物における電子状態変化の直接観測に成功～
- 2008.01.31 排ガス触媒の働きを探る～環境に優しい自動車と放射光の関係～
- 2008.02.01 平成 19 年度日本化学会各賞受賞者が決定
- 2008.02.28 ナノの世界の毛糸玉?～階層構造をもつ元素テルルの粒子～
- 2008.03.06 虹の X 線で見える「表面」～高速の X 線反射率測定法～
- 2008.03.27 八島正知氏 (東京工業大学) が日本金属学会功績賞を受賞されました
- 2008.03.27 彦坂泰正氏が日本物理学会若手奨励賞を受賞されました