

# ユーザーとスタッフの広場

## ◇ユーザー受賞記事

### 富田文菜研究員がロリアル - ユネスコ女性 科学者日本奨励賞受賞

東京工業大学の富田文菜博士研究員が、優れた研究成果を挙げた若手の女性科学者をたたえる「ロリアル - ユネスコ女性科学者日本奨励賞」を受賞しました。授賞式は日本工業倶楽部会館で行われ、富田氏を含む4名の受賞者それぞれに賞状が授与されました。



賞状と花束を手にした富田氏。

富田氏は東京工業大学大学院理工学研究科物質科学専攻博士課程在学中に腰原伸也教授の研究室に在籍し、日本科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業の一環として、JSTとKEK物質構造科学研究所の共同研究により推進された「腰原 ERATO 非平衡ダイナミクスプロジェクト」に従事しました。そしてタンパク質分子内を生命活動に不可欠な小分子が輸送される際に、タンパク質分子自身があたかも「深呼吸」をするように時々刻々と構造変形する様子を、KEK物質構造科学研究所の放射光科学研究施設 PF-AR のビームライン NW14 を用いて直接観測することに成功しました。生理活性な分子を取り込んだり、輸送・貯蔵する際に、タンパク質が大きく形を変えるメカニズムの一端を解明しただけでなく、タンパク質・酵素の機能解析、創薬などの基本であるタンパク質分子構造の概念に変更を加えて行く重要な基礎研究結果となりました。富田氏は現在も共同研究員として KEK に常駐し、放射光科学研究施設の足立伸一准教授とともに、タンパク質の構造ダイナミクスに関する研究を引き続き精力的に進めています。

パリに本社を置くロリアルグループと国連専門機関のユネスコは、世界の女性科学者の業績を称えるとともに、科学の分野で活躍する女性たちの世界レベルでの更なる飛躍と地位向上を目的に、1998年に共同で女性科学者を支援するプロジェクトを創設しました。

「ロリアル-ユネスコ女性科学者日本奨励賞」は、プロジェクトの理念を受け継ぎ、ロリアルグループの日本法人である日本ロリアル株式会社が日本ユネスコ国内委員会の協力のもと、2005年11月に創設したものです。生命科学または物質科学の分野において、博士課程（後期課程）に在籍あるいは、博士後期課程に進学予定の40歳未満の女性研究者を対象としており、2009年を含めこれまでに16名が受賞しました。

## SRI09 滞在記

東京工業大学総合理工学研究科 金子悠平

2009年9月27日から10月2日までの五日間に亘り、オーストラリア・メルボルンにて The 10th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI09) が開催されました。今回、PFのBL-6Cで実験を行ったX線共鳴磁気散乱の成果を紹介し意見交流をする目的で、ポスターセッションに参加しました。私は今まで国際学会はおろか国内の学会に参加したこともなかったため、今回の学会への参加は非常に貴重な経験でありました。ここでは、学会に参加した五日間のメルボルン滞在の感想や印象等を紹介させていただきます。

旅にトラブルは付き物だと言いますが、私も現地に到着する前に少しヒヤリとさせられる事態に遭遇しました。今回メルボルンへは成田からシドニーを経由して、そこから国内線に乗り継いで行きました。シドニーでは飛行機の到着時刻から国内線の出発時刻までは1時間あまりしかなく、その時間には入国手続きや税関審査が含まれるので、かなりタイトなスケジュールでした。時間がないにも拘わらず、本来行かなければならない国内線乗り継ぎの連絡口を間違えて他のゲートを出てしまい、更に空港がとても広かったために迷ってしまったのです。空港内をさまよいつつ、出発に間に合わないのではないかと大変焦りましたが、道を尋ねた空港職員の方がとても親切で、出発ゲートまで一緒に歩いて連れて行ってくれました。助けていただいたおかげで、何とかシドニー空港を出発することが出来ました。安心も束の間、メルボルンに無事に到着した後に到着荷物用のベルトコンベアの前で自分の荷物が運ばれてくるのを待ちましたが、一向に荷物が運ばれてきません。ロストバゲージかと思いましたが、シドニー同様空港職員の方が荷物の居所を調べてくれたところ、幸いすぐに見つかり次のシドニーからの飛行機で送られてくるとのことでした。どうやら出発時刻直前に搭乗手続きをしたので搬入に間に合わなかったようです。無事に荷物があることが分かり、初日早々、大事に至らなくて良かったと思いました。その後はトラブルに見舞われることもなく五日間を過ごすことができました。

現地の気候は、五日間の滞在中10°C近い気温の差があり、冬から春に季節が移り変わっていく様子を肌で感じることができました。暖かい日は、シャツ一枚で歩いている人を見かけることもあるほどで、比較的過ごしやすかったです。街は、様々な人種の人がいるとても活気がありました。その辺を歩いていて道を尋ねられたり、レストランやお店で店員さんが気軽に世間話をしてくれたりする機会が何度かあり、偶然かもしれませんがフレンドリーな人が多かったように思いました。メルボルンは大きな都市ではありませんが自然が所々にあつてのんびりリラックスできる公園等のスペースがたくさんあるところが個人的に魅力を感じました。中心街からトラムで20分ほど行ったセントキルダに



会議場の前で、メルボルンの中心街を背景に。

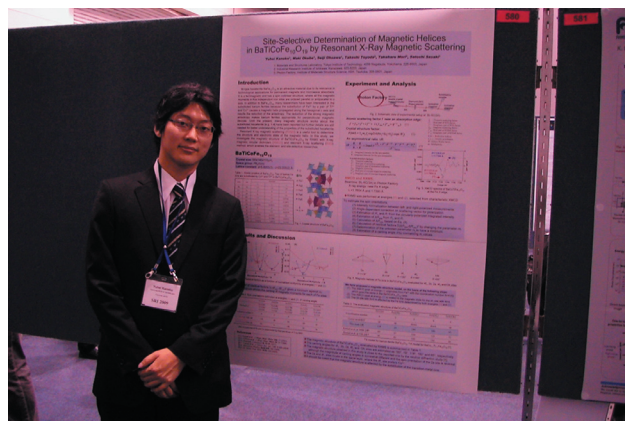
はビーチもあります。学会の合間をぬって私もトラムを利用しビーチを訪れましたが、そこからの眺めは最高でした。残念ながら泳げる季節ではなかったのでビーチは閑散としていましたが、夏になると手軽にリゾート気分を味わえることから大変賑わうそうです。ぜひ夏にまた訪れてみたいです。食事に関しては、日本食が流行っていました。至る所に日本語の名前のついたレストランがあり、寿司、お好み焼き、らーめん等の様々なメニューにありつきます。どれもおいしくて値段の割に量も多いので毎日食べていました。そして最後にもう一つ紹介したいのがビクトリアンビターというオーストラリアンビールです。苦みが強いのですが後味がスッキリしていて香りも良く、指導教員の先生と每晚飲みに行った程でした。機会がある方は是非お試しください。

さて、次は会議に関して書きたいと思います。2日目から本格的に会議が始まりました。まず朝一番に Plenary があって、その後3つのセッションに分かれて進行する形がとられていました。私は興味がある話をいくつか選んで発表を聞きに行きました。英語が聞き取れなかったり、知識が足りなかったりしたため内容を全て理解することはなかなか難しかったのですが、それでもスライドを見ながら発表を追っている内に、今まで触れる機会がなかった分野にも興味を持つようになりました。"Next Generation Sources" のセッションでは、放射光施設の将来計画に関して様々なアイデアがあることを初めて知って、特に興味深く聞きました。

3日目には、Australian Synchrotron (以下 AS) の施設見学ツアーが行われました。AS は、2007年にユーザーランを開始したばかりの新しい第三世代放射光施設で、建物は新しく美術館のような外観で印象に残っています。BL 内の装置はどれを見ても新しく、自分が見たこともない大きさの2次元ディテクターを見たときには本当に感動しました。まだ施設内にはスペースがかなりあるので、これからもどんどん新しい BL が建設されていくのではないのでしょうか。今回のツアーでは粉末回折 BL → X線吸収分光 BL → 小角・高角散乱 BL → 軟X線分光 BL → 赤外 BL → タンパク質結晶構造解析 BL → マイクロ蛍光X線分析 BL → 加

速器診断 BL → イメージング・医学セラピー BL の順番で見学コースが組まれていました。ツアーといっても堅苦しくなく、見学コース内は自由に行き来ができて途中では果物が配られるなどラフな雰囲気の中で回ることができました。各 BL では担当者の方が近くに立っておられ、質問をするたくさんの方で賑わっていました。ASに入れる機会はあまりないと思うので、貴重な経験だったと思います。

4日目には、いよいよ私が参加するポスターセッションが開かれました。初めての国際会議だったのでやや緊張していましたが、近くに日本人の方が多かったので軽く挨拶を交わすうちに幾らか落ち着きを取り戻すことが出来ました。私は、「Site-selective determination of magnetic helices in  $\text{BaTiCoFe}_{10}\text{O}_{19}$  by resonant X-ray magnetic scattering」と題した発表を行いました。私がポスターを展示した場所は会場の端だったので人通りは多くなかったのですが、足を止めてくださった方々は単結晶の構造解析に詳しい方が多く、かなり深い内容について繰り返し質問してくださった方もおられました。英語が得意なほうではないので、シドロドロになりつつも内容だけは諦めずに伝えようと思い、一生懸命説明しました。どこまで伝わったかは分かりませんが、海外の研究者の方に自分の研究について知ってもらい、しかも内容に深く興味を持ってもらったことは嬉しかったと同時に大きな自信になりました。また、自分のポスターに足を止めて見ている人がいない時間は、積極的に近くで発表している人のポスターの見学をするようにも心がけました。私の近くで発表されていたポスターは Diffraction に関連するものが多く、自分の分野に近いこともあり、発表者の方から興味深いお話を沢山聞くことが出来ました。また、逆に自分の研究の内容を尋ねられて議論に発展し、アドバイスをいただいたりもしました。ただ、今回のポスター発表では、コアタイムの最初から最後まで発表者がポスターの前に待機していなければならなかったため、発表日が同じで研究分野に近い方々との議論の時間を十分に取れなかったことが残念でした。例えばコアタイムを前半後半の二つに分けて行えば、発表者も自由に会場を見て回る時間ができ、同一セッション内での発表者同士で議論する機会を持つことも可能になるので、セッションをより有意義



ポスターセッションでの著者

なものにすることができるのではないかと感じました。あっという間に時間は過ぎ、ポスターセッションは終了しました。普段、研究室以外の人と専門的な意見交換をする機会は少ないのでとても刺激になりました。

ここまで、初めて国際学会に参加した雑感を書きました。このような経験をさせていただくことができたのも、指導していただいている佐々木先生をはじめ、研究室のメンバーの協力があつたからこそと、本当に心から感謝しています。今回の経験を糧に、これから日々精進していきたいと考えています。ありがとうございました。

## SRIに参加して

東京学芸大学 荒川悦雄

平成21年9月26日から10月5日まで豪州のメルボルン市に滞在し、SRI09に参加してまいりました。事務局受付によりますと、会議参加者総数は681名で、日本からは116名とのことでした。研究以外のことで市内を満喫したことを報告いたします。

メルボルン市は、小生の知っている町の中では、横浜のかつての関内のような町でした。港湾地域が隣接し、重厚な鉄道の橋脚の下を道路や路面電車がくぐり、議会や教会の古い建築物と現代的な超高層ビルが混在し、中華街やスタジアムがあり、夜の街ではひよろつとした若者が近寄って来る所でした。路面電車は、市内の環状線に限っては、無料で乗ることが出来、ガイドマップを手にした観光客を車内でよく目にしました。行き先案内のガイドさんも乗車していたことは、人の温もりを感じるようで印象的でした。路面電車は、昔、関内で乗ったような古風なものもあったり、車体ごと窓ガラスも覆う広告が描かれた新型の車両もありました。驚いたことに、新型インフルエンザ予防の為のマスクを、市内の現地の人は誰一人として、していませんでした。小生は用心のためのマスクをして、路面電車に乗り、人ごみの町を歩きましたが、喫茶店の窓ガラス越し



SRIのポスター会場入り口にて（左が著者）

に現地の人と目が合うたび、紳士淑女がいぶかしげな顔をしていました。後で聞いたところによると、現地では、相当重症な良くない病気の人がマスクをするものだとのこと、小生はそう思われたのでしょうか。

「Small Countryの」と自称するというAustralian Synchrotron施設を見学してまいりました。建設中の部分もありましたが、すべてが新品で、窓からの光が明るく射していました。ハッチや光源側以外の実験ホールでは飲食が出来るのだそうです。周囲クレーンが実験ホール内の天井に無いことを驚いていた人もいました。日本人の職員の有無を質問したところ、いないとのことでしたが、日本人の彼女を持った職員はいると、明るい口調で教えていただきました。豪州は国全体が植物園のようです。Australian Synchrotron施設から近未来に飛び出してくるであろう独自研究の世界が、ここにしかない独特の生態系を形成して行く可能性を思い浮かべました。

会議終了後に迎えた日曜朝は、夏時間に変わっていました。春とスクールホリデーが終わり、商店街のショーウィンドウにきりっと立つマネキンも軽装のスーツに着替えていました。新型インフルエンザのパンデミックを乗り越え、三寒四温で盛夏の足音を楽しみにする雰囲気のもと、新しい研究を切り開いて行くための元気を取り込み、溜め込んで参りました。

## 小角散乱国際会議 SAS2009 Oxfordに参加して

京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科 櫻井伸一

小角散乱国際会議は3年周期で開催される参加者500人規模の国際会議である。ちょうど3年前の2006年に京都で開催されたことは記憶に新しいが、その際、筆者も微力ながら組織委員の一員として携わったことが懐かしく思い出される。小角散乱国際会議では、次回開催地を参加者全員の意向投票によって決定するのがならわしになっているが、投票の前に行われた候補地PRのプレゼンテーションで、Anthony Ryan教授（英国Sheffield大学）が「ハリーポッターの夕食シーンの撮影に使われたカレッジでパンケットを！」が決め手となったのであろうか、真偽のほどは定かではないが、今回はOxford大学で開催された（図1）。参加者は450人超を数え、盛況であった。日本からの参加者は50人に迫る勢いで、開催国以外での国別参加者トップクラスを誇った。

対象分野は、高分子や生物関連材料を含むソフトマターから、金属材料に至り、広範囲におよんだ。手法としては、やはり、シンクロトロン施設を利用したX線小角散乱が主流であり、今回、特別にドイツ・ハンブルクのMichel Koch博士（図2）のシンクロトロン施設利用X線小角散乱装置開発の偉業を讃える「Koch Symposium」が開催されたことが印象に残っている。この記念シンポジ



図1 SAS2009が行われた、Oxford大学 Examinations Schools。白いテントが見えるが、この中でバンケットは行われた。

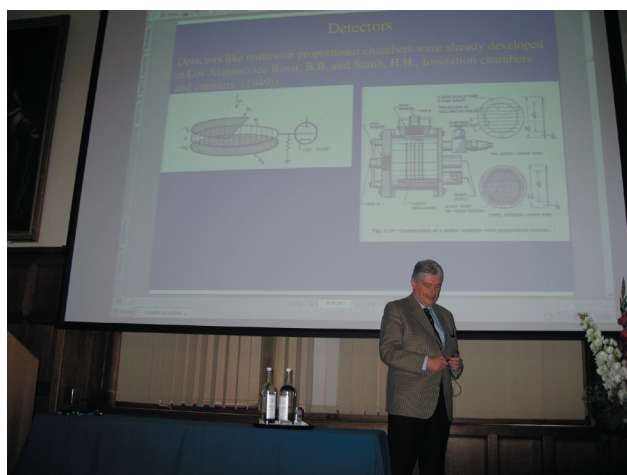


図2 講演する Michel Koch 博士(東大新領域 雨宮慶幸教授撮影)

ウムは、Michel Koch 博士ご本人の講演を含め、3件の招待講演で構成された(図3)。まず、Wim Bras 博士(オランダ・ベルギー・ビームライン @ESRF 責任サイエンティスト)による Koch 博士の経歴が丁寧に紹介され、その後、高分子の分野から、Anthony Ryan 教授による招待講演がなされた。Koch 博士の偉業を含めて、過去40年のシンクロトロン施設利用 X線小角散乱装置開発が高分子分野にもたらした大きな役割をあらためて振り返ることができた。引き続き、Koch 博士ご本人の講演では、装置開発のこれまでの道のりを振り返りつつ、現状と将来展望に話が及んだ。このような講演が聴けて、末席にいる一研究者として感無量であった。

言うまでもないことであるが、中性子小角散乱も重要な手法であることは間違いない。X線では限界のあるコントラストバリエーション法等、存在感を示していた。また、X線と中性子を相補的に組み合わせた研究が成果を上げていることも見逃せない。その意味でも、大型放射光施設 Diamond とパルス中性子施設 ISIS (ラザフォード・アプルトン研究所)を同時に見ることのできた学会主催の公式見学会によって、Oxford には、両方の施設が併設されてい



図3 Koch Symposium に関与した人たち。左から Anthony Ryan 教授、Wim Bras 博士、Michel Koch 博士、Giuseppe Zaccai 博士 (ILL グルノーブル; 招待講演)。

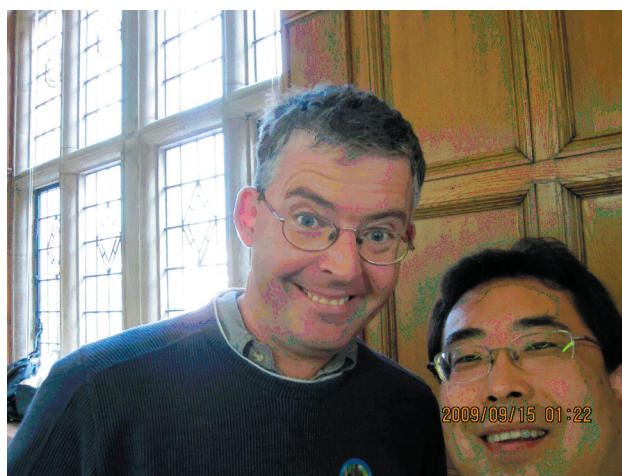


図4 ポスターセッションでの交流。左は古い友人で今回の会議の International Advisory Committee Chair でもある Ian Hamley 教授 (英 Reading 大学)、右は筆者。

る利点があるという実感を得た。

ポスターセッションは、2回に分けて行われた。合計、300件を超える規模で、それも仕方がないことであるが、到底見きれぬものではないと覚悟を決め、ピンポイントでとことん議論することに徹した。とはいえ、アルコールを呑みながらのくだけた雰囲気サイエンスを楽しみ、また、旧交を温めることができた(図4)。

バンケットは最終日前日の夜に行われた。残念ながら、ハリーポッターの夕食シーンの撮影に使われたカレッジでのバンケットは実現しなかったが、弦楽四重奏を間近で聞きながら、好きなアルコールに酔いしれ、気さくな大御所教授やご重鎮研究者らとの語らひに、大いに満足することができた。

次回、第15回小角散乱国際会議(SAS2012)は2012年にシドニーで開かれることが参加者の意向投票によって決定された。さらにその次の開催地もあわせて投票に付され、ベルリンでSAS2015が開催される運びとなった。小角散乱研究が、国際的にも学際的にも益々広がりを見せ、その重要性が幅広く認知されて行くことを確信した次第である。

## XAFS14に参加して

東京大学大学院理学系研究科 上村洋平

7月26日から7月31日にかけて、イタリア・カメリーノ大学で行われた14th International Conference on X-ray Absorption Fine Structure (XAFS14)に参加した。カメリーノはローマから車で4時間の所にあり、周囲は長閑な田園地域であった。朝の講演はカメリーノ大学で行われ、昼食後に町に移動して各々のセッションに別れて講演が行われた。カメリーノの町はローマと比べると非常に小さな町で、宿舎も大学の近くのゲストハウスであり、林間学校の様な学会だった。

このXAFS国際会議は3年に1回開催され、世界中のあらゆる分野からXAFSに関わる研究を行っている人たちが集まって行われる会議である。この会議で発表されている研究分野は、私の主たる測定対象である触媒などの材料・物質の構造解析や、XAFSの実験方法や解析手法及び理論研究、更には生体物質や環境試料などの状態・構造解析など非常に多岐に渡っていた。参加している研究者の専門分野も物理学、化学、生物、環境化学等々、普段話す機会のない分野の研究者が多かった。

私の研究が時間分解XAFSを扱っていることから、時間分解XAFSやin situ XAFS測定を行っている研究者と議論を行うことができた。今回は、白金-すずナノ粒子のXANESの強度の時間変化を利用した反応速度論について発表を行った。ポスターを聞きにきて頂いた方々には、ある程度内容を伝えられたと思う。しかしながら、反応経路中の中間状態や反応モデルについて、更に検討が必要だということを考えさせられた。またin situ XRDなど他の分析手法と組み合わせて、アルミナ上の白金-すずナノ粒子の結晶構造の情報などを検討することで、より詳細な反応のメカニズムを得ることもできると確信できた。この学会で得たことを今後の研究に生かしたいと思う。

発表の時に、適切な英語をその場で選ぶ事が難しいという事も痛感した。慣れもあると思うが、何を問われたか、



学会のポスター会場にて

どのような答えをするか、どのように答える事で一番分かりやすいかを素早く判断できるようになりたいと思った。普段のディスカッションなどで、これらのことを意識しておく必要があると感じた。

今回はポスター発表以外の参加目的に、去年XAFS Tutorialでお世話になったMichalowicz教授とNewville博士にお会いすることがあった。お二人とも顔を覚えてくださっていて、Social Dinnerの際に色々とお話をさせていただいた。

またXAFS業界の有名人(!?)の方々とも直にお話しする機会に恵まれた。IXSのwebサイト内でXAFSの解析ソフトの解説をしているKelly博士や、AtomsやEmacs上で起動する解析プログラムを作成しているRavel博士と直接お話をすることができた。Bruce博士には彼の作成したプログラムについて以前から疑問であった事をお話することができ、有益な情報を得る事ができた。

日本からもXAFSに関わる多数の先生方や学生の方が参加していて、普段お話をする機会が少ない先生方ともお話をする機会が得られた。特に普段聞くことのできない先生方の研究の教条や哲学など示唆に富んだお話を伺うことができ、有益な時間を過ごすことができた。

次回のXAFS Congressは北京で行われる事になっている。Michalowicz教授とも次回の会議でお会いする事を約束した。今回はポスター発表であったが、次回は口頭で発表できる様にこの3年間精進を重ねたいと思う。

## XAFS14 体験記

広島大学大学院理学研究科 柏原輝彦

2009年7月26日から31日までの6日間、イタリアのカメリーノ大学でXAFS14が行われました。この国際会議は3年に1度開催され、XAFSの実験技術や理論、周辺の応用分野等の最先端の話題を議論する学会です。私自身は普段、生体試料や地球化学試料に対してXAFSを応用する立場で研究してはいるのですが、あまりこういった分析手法をメインにした学会には馴染みがないため、国際会議の初経験もかねて、単純に興味本位で参加しました。その時感じたことを簡単に記したいと思います。

カメリーノは地図にも載っていないような小さな村で、その景色のよさにはびっくりしました。360度ほぼ山肌しか見えず、花の香りがするのんびりとした場所ですが、本当に何もなく観光ではまず行かないような場所だと思いました。そんな中、学会参加者は、大学の周りに点在する学生寮に集まって寝食を共にしました。一日中、身分を問わず色々な人たちと交流する機会を持てたことは非常に良かったと思います。海外の著名な研究者とお話できたことはもちろん感激でしたが、こういう場で日本人同士の敷居が下がり、普段話さない人たちと沢山知り合いになれたことも、今回、特に新鮮に感じました。普段は中々お話しするこ

ともできない大先生達と一緒に飲みに行ったり、ジェラートを一緒に並んでペロペロとなめたりするのも、なんだか不思議な感じがしました。

学会中は、自分の興味のあるセッション（環境、生体、装置、解析等）を中心に発表を聞きました。触媒や材料化学の分野で日本人の発表が非常に多いのに対し、環境・生体分野ではほとんどの発表者や聴衆が外国人でした。このことは、日本においてこれら分野での放射光利用がまだまだ遅れていることを示していると思います。ただ、特に生体分野に関しては、世界的にどのグループも発展途上の印象を受けました。どのグループもマイクロビームを用いた生体試料の XAFS を盛んに行い、その有用性を主張してはいるものの、実際には、細胞を構成するオルガネラはナノスケールであるとともに、いかにして試料が生きている状態を保持して分析できるかといった点が重要な課題として認識されています。したがってどの研究もまだまだ改善すべき点が多いと感じました。また、他の分野と比較して、測定を行ってデータを取得するだけの研究が多かったので、生物試料特有の難しさはあれども、もっと試料のもつバックグラウンドに基づいて色々と議論するべきではないか、とも感じました。

私自身は地球化学の研究としてモリブデンの同位体分別機構に関するポスター発表をしました。単純に英語力不足で、研究内容を伝えることに苦労しましたが、コアタイムが二日に亘っていたために、下手なりに良い練習になりました。正直、同位体に関しては他分野の方々にはあまり興味をもたれていない印象を受けましたが、実はこの分野では近年、非常に盛んに議論されている話題です。地球化学の XAFS 利用で最も有名な研究者の一人である Alain Manceau 氏に熱心に聴き入っていただき、色々とディスカッションできたことは、非常に感激でした。

異なる研究分野の人たちと話をすることで、XAFS の応用研究に対する自分なりの向き合い方を考えさせられたことも、有意義な経験でした。参加者には、放射光施設のビームラインサイエンティストから、XAFS をメインの手法として頻繁に用いる人、普段はあまり用いない人、理論計



仲良くなった日本人同士で集合写真

算をメインとする人まで、さまざまな立場の人たちがいましたが、その人たちと話しをする中で、自分は理論や解析等の知識がまだまだ足りず、一つのスペクトルから情報を引き出し切れていないと感じました。一方で、将来 XAFS を応用する研究者を目指すものとして、手法に過信して一辺倒になるのではなく、知りたい情報に対して XAFS でどこまで議論できるのかを明確に意識し、定量分析等の他の実験と合わせて総合的に議論していくことも重要であると強く思いました。

その他にも、飲み会や食事等の楽しみはもちろんのこと、夜は学生同士集まってトランプをしてみたり、同部屋の外国人と研究について話し込んだりと、朝から晩まで XAFS を通して幸せな時間を過ごすことができました（XAFS って本当にいいですね）。

学会終了後、ローマに泊りして観光しましたが、カメリーノでのゆったりとした時の流れが体に染み付いたせいなのか、カメリーノの生活で味わったほどの感動はありませんでした。それだけ充実していて楽しい時間を過ごせていたのだと思います。本当に色々な人たちと出会うことができ、有意義な経験となりました。今回感じたことを忘れず、出会った人たちとのつながりを大切にしたいです。次の開催は 2012 年の北京です。是非、今後も継続して参加したいと思っています。

## コーネル大学滞在記（その 4）

加速器第七研究系 宮島 司

2007 年 3 月から 2008 年 3 月末までの 1 年間、アメリカ合衆国コーネル大学に出張して、主にエネルギー回収型リニアック（ERL）入射器のビームダイナミクスについて研究を行ってきた。PF news Vol. 26 No. 4 では、コーネル大学滞在記その 1 としてコーネル大学に渡航するまでの経緯とその準備について、PF news Vol. 27 No. 1 ではその 2 としてコーネル大学での生活の立ち上げについて、PF news



学会会場からの眺め

Vol. 27 No.2 ではコーネル大学での研究生活について紹介した。今回は、コーネル大学滞在中に行った研究の続きと、帰国について紹介し、コーネル大学滞在中の終了としたい。

2007年8月からは、ERL入射部テストビームラインの最適化計算の研究の続きとして、合流部での最小エミッタンスの評価を行った。合流部は複数台の偏向電磁石により構成される部分で、入射器から生成されたビームを周回部軌道に合流させることから、合流部と呼ばれる。この部分ではビーム内の電子のエネルギー差による軌道のずれ、分散関数の影響を考慮しなければならない。コーネル大学でこれまで私が行ってきた計算は、この部分の手前まで（全て直線軌道）であったが、入射器全体のビームダイナミクスを考えるには、合流部（曲がった軌道）をきちんと計算に入れなければならない。この部分での難しさは、二つある。一つはバンチ内の電子間に働くクーロン力による空間電荷効果と分散関数が結合し、エミッタンス増大が引き起こされるということである。この影響を緩和するには、合流部で軌道が曲げられる角度をなるべく小さくする方法と、対称性の高い電磁石の配置を利用する方法、そして合流部に入射するビームの光学関数を最適化する方法がある。最も良い方法は、合流角度を浅くすることであるが、これは二つ目の問題である実際の機器の配置が困難になる問題と絡んでくる。合流角を浅くするという事は、周回部軌道と入射部軌道を分離するのに距離が必要となり、周回部と入射部に設置される電磁石等の機器同士が接近しすぎて配置できなくなるという問題を引き起こす。このため合流角はある程度以下に小さくすることは困難である。また、対称性の高い電磁石の配置として、zigzag-mergerという形式が提案されている[1]が、これも機器の設置においては不利な面が大きい。このように合流部の形式には、ビームダイナミクスの問題と現実の機器の配置の問題の2つが絡んでおり、実際に配置可能な合流部形式で、どの程度のエミッタンス増大が起きるかを見積もることが、ERLで超低エミッタンスビームを実現する上で重要となる。私がコーネル大学滞在中に行った計算では、コーネル大学テストビームラインで使用する形式（偏向電磁石3台）、zigzag-merger（偏向電磁石4台）について計算を行った。予想通り zigzag-merger が有利であるという結果が得られたが、合流部手前でビーム光学関数を調整することによって、偏向電磁石3台の形式でも許容できるエミッタンス増大に抑えられることを示すことができた。

また、合流部では偏向電磁石によってビーム軌道が曲げられるが、このときバンチ長が短いと Coherent Synchrotron Radiation(CSR)の影響が無視できなくなる可能性があった。このため、正しくビームを評価するにはCSRの影響も計算に取り入れる必要があった。ただし、通常よく使用されるCSR計算では、ビームは超相対論的であるという仮定が用いられており、入射部のような10 MeV程度のビームには適用できない。そこで、入射部のような低エネルギー領域でも有効なCSR計算コードを開発することとした[2]。計算アルゴリズムはSaganの方法[3]を使用して、

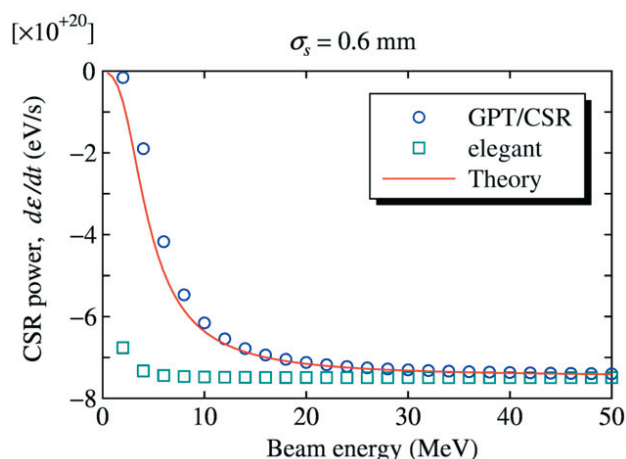


図1 円軌道上でのCSRによるエネルギー損失のビームエネルギー依存。○が今回作成したコードによる計算結果。

CSR計算コードを開発し、理論計算と比較検証した。検証の結果、ERL入射器のような10 MeV程度の低エネルギー領域でも正しくCSRによるエネルギー損失を計算できることを確認した(図1)。これを使用して、合流部でのCSRの影響を見積もれるようになった。

これらのコード開発とともに、電子銃テストビームラインでの実験にも継続して参加した。電子銃テストビームラインでは、電子銃カソード材質の違いによる時間応答の測定を行った[4]。ERL用電子銃では、半導体であるフォトカソードを用い、この表面にNEA表面を作成することによって電子を効率良く取り出している。電子を取り出す際には、カソード表面にレーザーを当てているが、レーザーが当たってから電子が放出されるまでには有限な時間の遅延が存在し、導入したレーザー波形そのままの電子ビームが生成されるわけではない。仮にこの時間応答が悪い材質だと、せっかくレーザーパルスを短く整形しても、生成された電子ビームは長いテールを引いてしまい、パルス整形の意味がなくなってしまうことになる。そこで、カソード材質毎の応答時間を調べるために、電子銃テストビームラインで測定を行った。具体的には、1 psのレーザーパルスを当てた後に生成される電子ビームの時間方向プロファイルを、偏向空洞とビュースクリーンを用いて測定した。実験では、バルクのGaAsとGaAsPを用いた。最初にGaAsPを測定したのだが、導入したレーザーに対して予想以上に長いテール(20 ps以上)が観測された。このテールは量子効率を上げるほど増大し、すなわち量子効率が上がったときに出てくる電子の多くは、長いテールを形成してしまうことを意味している。これは、大電流で短パルスかつ超低エミッタンスビームを作る上では致命的であり、ERLで超低エミッタンスビームを実現できるのかと不安になってしまった。その後、引き続いてGaAsを測定したところ、GaAsPのような致命的なテールは観測されなかったため、実験していたみんなが安心した。

最後に、帰国する頃の様子を紹介したい。帰国準備を進めていた2008年3月に日本から、加速器第七研究系の帯

名さん、長橋さん、広島大学からの特別共同利用研究員である松葉さんがコーネル大学を来訪された。PFの人と会うのは久しぶりであったので、楽しい時間を過ごさせて頂いた。CESRのリングやERLテストビームライン、コーネル大学内を案内した。滞在していた当時は現地の気候に慣れていたので暖かい日に案内したつもりであったが、今から考えると氷点下一桁の寒いなかいろいろと連れまわしてしまったので反省している。

帰国の準備は2008年2月の終わりくらいから開始した。帰国準備として、アパートの解約、車の売却、身の回りの物品のリサイクル、日本への荷物の発送などを行った。アパートの解約は、事前に通告する期限の前に解約したいことを伝えた後は、退去直前まで特に何もなかった。退去1週間くらい前になってからアパートの管理人さんに退去手順などを教わった。管理人さんには部屋を綺麗にしておいてねと言われたので、トラブルにならないようにと、かなり気合を入れて隅から隅まで掃除を行った。水道蛇口などもぴかぴかに磨きあげた。しかし、退去前日にいざ検査となると管理人さんは割と適当に部屋を見回らただけで、最後にとっても綺麗ねみたいなことを言ってそれで終わりになったので、拍子抜けしてしまった。図2に1年間お世話になったアパートの写真を示す。車の売却は、購入したディーラーに持ち込んで見積もりを出してもらった。6か月ぶりにディーラーに行くと、店の名前がいつの間にか変わっていたが、問題なく交渉も進み、購入金額の半額くらいで売却できることとなった。私の車は、恐らく日本だと廃車費用を取られるような走行距離であったが、アメリカではまだまだ現役として次のオーナーを待つようである。ときどきエンジンが掛らないとか、ウィンドウが上がらないとかあったが、とても良い車であったと思う。身の回りの物品の処分は、イサカに住む日本人で作るメーリングリストを利用した。日本から持ち込んだ炊飯器や70ドルで買ったプリンター、調理器具など大体のものは貰い手が見つかった。ただ、クリスマスの季節に近所のスーパーマーケットで格安の14ドルで購入したピンボールゲームは誰も貰い手が着かず、泣く泣くゴミ箱行きとなった。日本への荷物



図2 コーネル大学滞在中に住んでいたアパート。部屋は3階。

の発送には、郵便局のPriority Mailというのを利用した。初めは船便を使って安く済ませるつもりであったが、いつの間にか船便が廃止になっていたので、航空便のPriority Mailを利用することになった。帰国のフライトは、イサカ空港からではなく、シラキウス空港からデトロイト経由とした。理由はイサカ空港からだとプロペラ機だということと乗り継ぎのデトロイト空港での待ち時間が8時間近くあったからである。ただ、シラキウス空港はイサカから車で1時間半くらいかかる（イサカ空港までは20分くらい）。このときすでに車は売却済みだったので、足がなくて困っていたが、総務省からコーネル大学に留学に来られていた方のご厚意によって、シラキウス空港まで送って頂けることになった。シラキウスからのフライト時刻が早朝だったため、フライト前日に送って頂いて、今回の滞在最終日はシラキウスのホテルで過ごすことにした。今回の滞在でのアメリカ最後の夕飯は、このホテルのレストランで食べたベペロンチーノであったが、茹で過ぎてぶつ切れの水っぽいパスタが出てきて辟易したのを今でも鮮明に思い出せる。

以上4回に渡って、コーネル滞在記と題して纏まりのない話を書かせて頂いた。原稿が度々遅れることがあったがその都度サポートして頂いたPF秘書室の高橋さん、PF news編集委員の方々に感謝したい。今回のコーネル大学への滞在（2007年3月から12月）は、総合研究大学院大学の海外先進教育研究実践支援制度を利用させてもらった。この派遣制度への応募を勧めて頂いた春日教授、小林幸則主幹に感謝したい。また、2008年1月から3月までの滞在延長は、河田ERL推進室長のお力により実現することができた。私がコーネル大学滞在中にPF、PF-ARの仕事を負担して頂いた電磁石・電子軌道グループの原田さん、長橋さん、そして加速器第七研究系（旧放射光源研究系）の皆様へ感謝したい。最後に、今回の滞在での日常的な雑務（アパート関係、車関係、引っ越し関係、生活関係など）は、さも私が行ったように書いているが、滞在途中からは妻にほとんどをお願いしていた。車の修理のディーラーへの依頼やアパートの退去手続きなど面倒なことを引き受けてくれ、研究に専念できる環境を作ってくれた妻に感謝する。

#### 参考文献

- [1] Vladimir N. Litvinenko, Ryoichi Hajimab, Dmitry Kayran, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 557 (2006) 165–175.
- [2] Ivan V. Bazarov and Tsukasa Miyajima, Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, 2008, pp.118-120.
- [3] D. Sagan, Proceedings of EPAC06, Edinburgh, Scotland, 2006, pp. 2829-2831.
- [4] Ivan V. Bazarov, Dimitre G. Ouzounov, Bruce M. Dunham, Sergey A. Belomestnykh, Yulin Li, Xianghong Liu, Robert E. Meller, John Sikora, and Charles K. Sinclair, Frank W. Wise and Tsukasa Miyajima, PRST-AB 11, 040702 (2008).



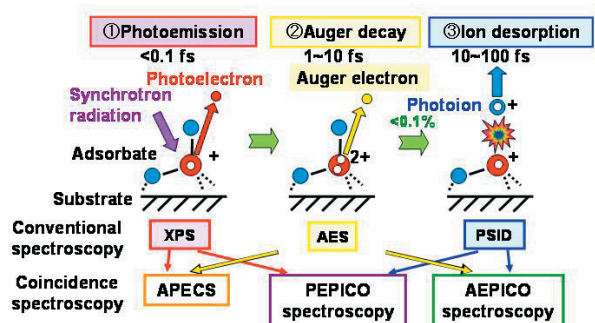
# 表面研究用オージェ電子-光電子コインシデンス分光, 電子-イオンコインシデンス分光兼用装置, および電子-極角分解イオンコインシデンス分光装置の開発

垣内拓大<sup>1,a</sup>, 小林英一<sup>2,b</sup>, 間瀬一彦<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 総合研究大学院大学, <sup>2</sup> 物質構造科学研究所

## 1. はじめに

固体の表面に光や電子を照射したときに、表面分子の電子励起によって分子やイオンが脱離する現象（電子遷移誘起脱離, Desorption Induced by Electronic Transitions, DIET）は表面科学における重要研究テーマである [1-3]。また試料に放射光を照射したとき起きるダイナミックスの研究は放射光科学研究者の関心を集めている。表面に軟X線を照射すると、1) 内殻光電子放出 ( $10^{-16}$  秒), 2) オージェ過程 ( $10^{-15}$ ~ $10^{-14}$  秒), 3) イオン脱離 ( $10^{-14}$ ~ $10^{-13}$  秒) という一連のオージェ刺激イオン脱離 (Auger-stimulated ion desorption, ASID) 現象が起きる (Fig. 1)。ASID 機構を詳細に研究するには、オージェ電子と光電子を同時に測定するオージェ電子-光電子コインシデンス分光法 (Auger photoelectron coincidence spectroscopy, APECS), 光電子と光イオンを同時に測定する光電子-光イオンコインシデンス (photoelectron photoion coincidence, PEPICO) 分光法, オージェ電子と光イオンを同時に測定するオージェ電子-光イオンコインシデンス (Auger-electron photoion coincidence, AEPICO) 分光法が最適である [4]。また, APECS は、オージェ過程の詳細の研究, サイト選択的オージェ電子スペクトルの測定, 表面界面局所価電子状態の研究などにも利用できる。一方, PEPICO 分光は、1) 表面吸着水素を高感度に検出できる, 2) 脱離イオンが結合していた原子サイトを特定できる, という特色を持っており, AEPICO 分光は種々のオージェ過程とイオン脱離の相関を解明できるという特長を持つ [5-7]。我々はコインシデンス分光利用研究の一層の発展を図るため, 1台で APECS, AEPICO, PEPICO 分光を行なうことができる新



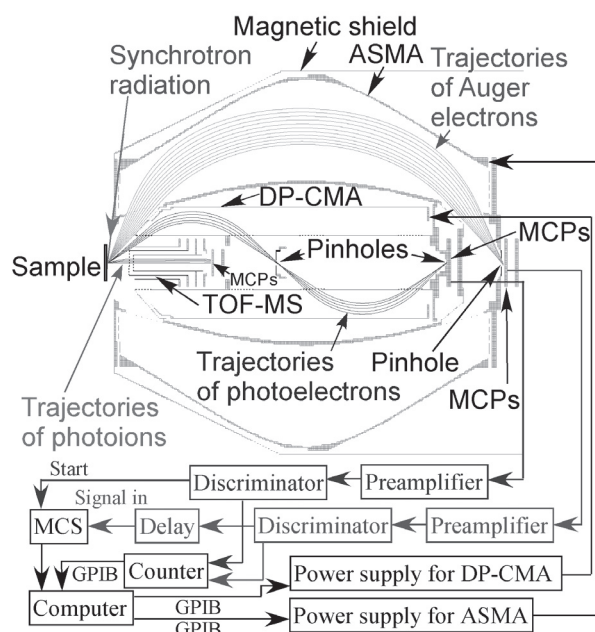
**Figure 1**  
Schematic of a normal Auger-stimulated ion desorption (ASID) mechanism; that is, 1) core-electron ionization, 2) an Auger transition leading to a two-valence-hole state, and 3) ion desorption along the repulsive potential energy surface of the two-valence-hole state. APECS as well as PEPICO and AEPICO spectroscopy provide direct information on the correlation among the photoemission, the Auger decays and the ion desorption.

しい電子-電子-イオンコインシデンス (electron electron ion coincidence, EEICO)分光装置を開発した [8, 9]。また我々は、脱離イオンの質量と収量, 脱離極角, 運動エネルギーに関する情報まで得ることを目的として、電子-極角分解イオンコインシデンス分光装置を開発した [10, 11]。本稿では最新の電子-電子-イオンコインシデンス分光装置 [9] と最新の電子-極角分解イオンコインシデンス分光装置 [11] の詳細を紹介する。

## 2. 電子-電子-イオンコインシデンス (EEICO) 分光装置

### 2-1. EEICO 分光装置

新しい EEICO 分光装置と APECS 計測系を Fig. 2 に示す。EEICO 分光装置は、同軸対称鏡型電子エネルギー分析器 (coaxially symmetric mirror electron energy analyzer, ASMA) およびダブルパス円筒鏡型電子エネルギー分析器 (double-pass cylindrical mirror electron energy analyzer, DP-CMA), 飛行時間型イオン質量分析器 (time-of-flight ion mass spectrometer, TOF-MS), 磁気シールド, XYZ ステージ, 傾き調整機構, ICF203 から構成される。ASMA と DP-CMA, TOF-MS は、同軸同焦点で設計されていて, TOF-MS は DP-CMA に内蔵され, DP-CMA は ASMA に内蔵されている。EEICO 分光器は、厚さ 0.5 mm, 外径 140 mm, 全長 150 mm のパーマロイ -78 製磁気シールドで覆われ, 外部磁場から遮蔽されている。試料表面と EEICO 分光器前端板までの距離は 2.5 mm である。EEICO 分光器は超高真空仕様であり, 金属材料としては非磁性の SUS310S およびインコネル 600, 真空焼鈍して消磁した SUS304 ナベビス, 絶縁材料としてはアルミナおよびポリイミドチューブを使用している。



**Figure 2**  
Schematic diagram of the new EEICO analyzer and the measurement system for APECS [9]. The trajectories of electrons and ions simulated with the SIMION 3D Version 7 are also shown.

### 2-2. 同軸対称鏡型電子エネルギー分析器 (ASMA)

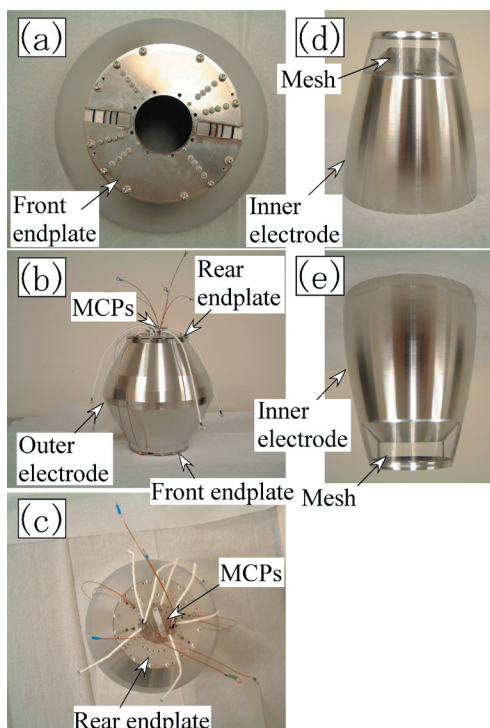
ASMA (Fig. 3) は、外電極、内電極、4枚の補正電極を設置した前(後)端板、ピンホール、およびマイクロチャンネルプレート(MCPs, 浜松ホトニクス, F4655)から構成される。外電極および内電極の形状は、

$$\phi = a \ln r - a \left( \frac{r^2}{2} - z^2 \right) + d \quad (1)$$

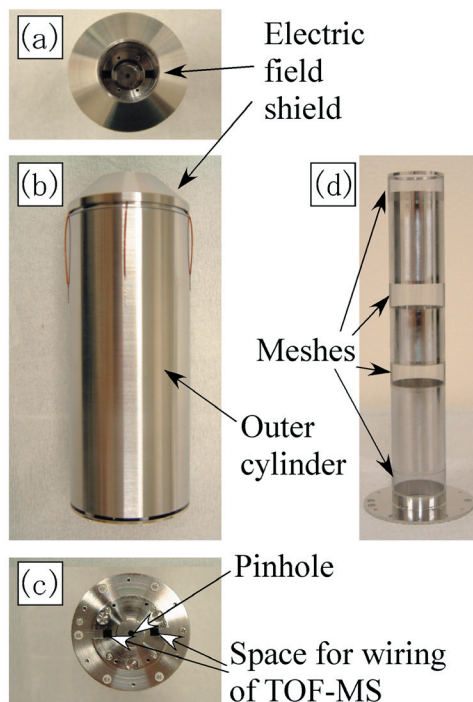
によって与えられる [12]。ここで、 $\phi$  は電位、 $r$  は中心軸からの距離、 $a$  と  $d$  は定数、 $z$  は、中心軸方向の距離である。ASMA 外電極の外径は 137.5 mm, 試料表面からピンホールまでの距離は 143.5 mm である。内電極の開口部にスポット溶接されたメッシュの透過率は 88%, MCP 前のピンホールの内径は 1.0 mm, 電子の取込み極角 ( $\alpha \pm \Delta\alpha$ ) は、 $59.5^\circ \pm 11.5^\circ$  (立体角は  $\Omega = 1.81$  sr) である。実効的な透過率  $g$  は

$$g = (\Omega/4\pi) \times (T_{\text{mesh}})^n \times D_{\text{MCP}_e} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $T_{\text{mesh}}$  はメッシュの透過率 ( $T_{\text{mesh}} = 0.88$ ),  $n$  はメッシュの枚数 ( $n = 2$ ),  $D_{\text{MCP}_e}$  は MCPs による電子の検出効率 ( $D_{\text{MCP}_e} \sim 0.5$ ) であるので、本 ASMA では  $g \sim 0.056$  である。ASMA で分光される電子の運動エネルギー ( $KE_{\text{ASMA}}$ ) は、 $KE_{\text{ASMA}} = 1.83 \times eV_{\text{ASMA}}$  によって決まる。ここで、 $V_{\text{ASMA}}$  は、ASMA 外電極に印加する電圧である。ASMA は  $\alpha \sim 60^\circ$  において 2 次の収束条件を満たすため、高分解能と高感度を両立することができる。



**Figure 3**  
(a) The front view of the ASMA [9]. (b) The side and (c) back view of the ASMA with a built-in DP-CMA and TOF-MS. (d, e) The inner electrodes of ASMA, where the apertures are covered with meshes.



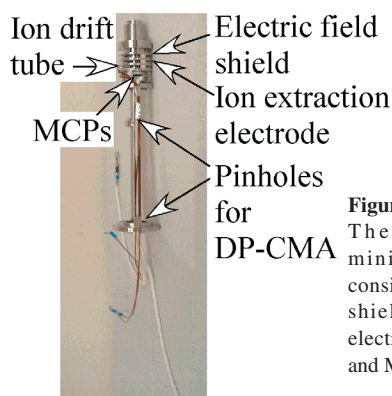
**Figure 4**  
(a) The front, (b) the side, and (c) the back view of the DP-CMA. (d) Inner electrode with meshes [9].

### 2-3. ダブルパス円筒鏡型電子エネルギー分析器 (DP-CMA)

DP-CMA (Fig. 4) は、外電極、内電極、ピンホール、および MCPs (浜松ホトニクス, F4655) から構成される。DP-CMA 外電極の内径は 40 mm, 内電極の外径は 20 mm, 試料表面から第 1 段目および 2 段目のピンホールまでの距離は順に 61.2 mm, 122.8 mm である。内電極のアーチャーに張られたメッシュの透過率は、84% である。DP-CMA の第 1 段目および 2 段目の MCP 前に設置されたピンホールの内径は、順に 2.0 mm と 1.5 mm,  $\alpha \pm \Delta\alpha = 37.5^\circ \pm 4^\circ$ ,  $\Omega = 0.43$  sr である。本 DP-CMA の実効的な透過率  $g$  は  $T_{\text{mesh}} = 0.88$ ,  $n = 4$ ,  $D_{\text{MCP}_e} \sim 0.5$  を (5) 式に代入して  $g \sim 0.0085$  である。DP-CMA で分光される電子の運動エネルギー ( $E_{\text{DP-CMA}}$ ) は、 $E_{\text{DP-CMA}} = 1.907 \times eV_{\text{DP-CMA}}$  によって決まる。ここで、 $eV_{\text{DP-CMA}}$  は、DP-CMA 外電極に印加する電圧である。CMA は  $\alpha = 42.3^\circ$  において、2 次の収束条件を満たすが、本装置では  $\alpha = 37.5^\circ$  であるので、1 次の収束条件しか満たしていない。このため、 $\Delta\alpha$  を小さくして高分解能化を図っている。

### 2-4. 飛行時間型イオン質量分析器 (TOF-MS)

TOF-MS は、電場シールド、イオン引込み電極、ドリフトチューブ、および MCPs (浜松ホトニクス, F4655X-D10, 外径 17 mm, 有効径 6.5 mm の特注品) から構成される (Fig. 5)。試料表面とイオン引込み電極間の距離は 7.5 mm, イオン引込み電極前面とドリフトチューブ前面までの距離は 1.5 mm, ドリフトチューブの長さは 25.5 mm, イオン引込み電極とドリフトチューブの内径の直径は、それぞれ 8.5 mm, 5.5 mm である。イオン引込み



**Figure 5**  
The side view of the miniature TOF-MS that consists of an electric field shield, an ion extraction electrode, an ion drift tube, and MCPs [9].

電極とドリフトチューブにスポット溶接したメッシュの透過率は、77%である。イオン引込み電極とドリフトチューブに適切な電圧を印加してすべての脱離イオンを捕集する場合、TOF-MSの実効的な透過率  $g$  は

$$g = (T_{\text{mesh}})^n \times D_{\text{MCP}_{\text{ion}}} \quad (3)$$

ここで、 $D_{\text{MCP}_{\text{ion}}}$  は MCPs によるイオンの検出効率 ( $D_{\text{MCP}_{\text{ion}}} = \sim 0.6$ ) である。本 TOF-MS では  $T_{\text{mesh}} = 0.77$ ,  $n = 2$  であるから、 $g = \sim 0.35$  である。

## 2-5. 組立て

TOF-MS を DP-CMA に内蔵し、DP-CMA を ASMS に内蔵する際、もっとも難しいのは配線処理である。本装置では配線スペースを2箇所設け、DP-CMA と ASMA の方位角における死角を最小限に抑えつつ、組立て容易な構造に設計している (Figs. 3-5 参照)。

## 3. EEICO 分光装置の性能評価

### 3-1. EEICO 分光装置の性能評価条件

本 EEICO 分光装置の性能評価は、PF の BL-1C にコインシデンス分光専用超高真空槽 (到達圧力:  $1.5 \times 10^{-8}$  Pa) を用いて行なった。放射光は、試料表面法線方向  $84^\circ$  から入射し、試料表面上でのスポットサイズは  $0.1 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  (縦  $\times$  横)、励起エネルギー 130 eV における放射光のエネルギー分解能  $E/\Delta E$  は  $\sim 5000$  であった。

性能評価に用いた Si(001)- $2 \times 1$  清浄表面は、(1) シリコン (Si) ウェハ (厚さ 0.5 mm) から切り出した短冊状の Si 片を、自作の試料マニピュレーター [13] の先端に取付け、(2)  $< 5.0 \times 10^{-7}$  Pa の超高真空下で、Si を  $\sim 1100^\circ \text{C}$  まで通電加熱することで Si 酸化膜を取除き、(3) 室温までゆっくりと冷却する、といった手順で作製した。Si(001)- $2 \times 1$  の表面再構成は、低速電子線回折 (Low-energy electron diffraction, LEED) パターンで確認した。

EEICO 分光装置の性能は、Si(001)- $2 \times 1$  清浄表面の Si  $2p$  光電子スペクトル (PES) 測定および、Si(001)- $2 \times 1$  清浄表面の表面サイトを選別した Si- $L_{23}$  VV-Si- $2p$  APECS 測定を行うことで評価した。また、本 EEICO 装置が PEPICO 分光、AEPICO 分光測定においても従来以上の性能を発揮するこ

とは、凝縮有機珪素分子  $\text{SiF}_3\text{CD}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{CH}_3)_3$  (FSMSE) の実験を行なうことで確認した。

### 3-2. APECS 測定方法

ここで、EEICO 分光装置による Si(001)- $2 \times 1$  清浄表面の Si  $L_{23}$  VV オージェ電子 - Si  $2p$  内殻光電子コインシデンススペクトル (Si- $L_{23}$  VV-Si- $2p$  APECS) の測定方法について簡潔に記す。放射光を照射された Si(001)- $2 \times 1$  から放出された Si  $2p$  内殻光電子は、DP-CMA によって分光され、MCPs でパルス信号として検出されたのち、マルチチャンネルスケラー (MCS, Laboratory equipments, LN-6500R, 分解能 1 ns) のトリガーシグナルとして入力される (Fig. 2 参照)。一方、Si  $L_{23}$  VV オージェ電子は、ASMA によって分光され、MCPs でパルス信号として検出されたのち、100 ns の遅延回路 (delay) を介して MCS に入力される (Fig. 2 参照)。この計測システムで一定時間データを積算すると、飛行時間 (TOF) スペクトルを得ることができる。トリガー光電子と同時に放出されたオージェ電子のシグナル (真のコインシデンスシグナル) は、トリガー光電子の検出時間を時刻 0 ns とすると、

(オージェ電子の ASMA 内での飛行時間)

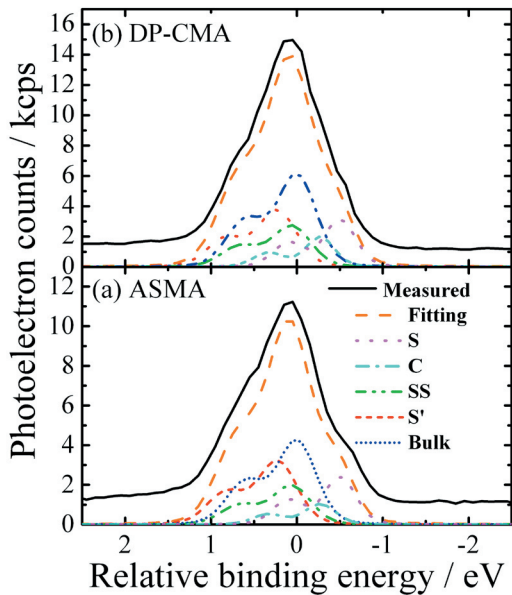
+ (遅延時間, 今回の測定では 100 ns)

- (光電子の DP-CMA 内での飛行時間) (4)

の位置に現れる。一方、トリガー光電子と無関係の過程で放出されたオージェ電子は (4) 以外の飛行時間領域にランダムに現れ、バックグラウンドを形成する。APECS TOF スペクトルのコインシデンスピークの積分値を  $AeKE$  の関数としてプロットすると Si- $L_{23}$  VV-Si- $2p$  APECS が得られる。一連の APECS 測定においては、光電子シグナル、オージェ電子シグナルも同時に測定している。このオージェ電子シグナルを用いると APECS とまったく同じ条件で測定したオージェ電子スペクトルを得ることができる。このスペクトルをシングルスオージェ電子スペクトル (singles AES) と呼ぶ。シングルス AES が通常のオージェ電子スペクトルに対応するのに対し、APECS はトリガー光電子に対応する AES を選択的に測定する。

### 3-3. Si(001)- $2 \times 1$ の Si $2p$ 内殻光電子スペクトル測定

ASMA および DP-CMA を用いて測定した室温の Si(001)- $2 \times 1$  清浄表面の Si  $2p$  PES とカーブフィッティングの結果を Fig. 6 に示す。Si(001)- $2 \times 1$  のバルク Si  $2p$  準位を基準とした4つの表面 Si  $2p$  成分 (S および, C, SS, S') の相対的な結合エネルギーは、-0.5, -0.23, +0.06, および +0.23 eV であった。これらの値は、従来の高分解能 Si  $2p$  PES の結果と一致している [14]。以上のフィッティングにおいて、ガウス幅は  $\sim 0.48$  eV, ローレンツ幅は 0.08 eV,  $2p_{1/2}$  と  $2p_{3/2}$  の間のスピナー軌道分裂は 0.6 eV, 強度比 ( $2p_{1/2}/2p_{3/2}$ ) は 0.5 とした。フィッティングで得られたガウス幅から見積もった ASMA および DP-CMA の  $E/\Delta E$  は、運動エネルギー (KE) 領域 20-30 eV の範囲で両方とも  $\sim 55$  であった。特に、DP-CMA の  $E/\Delta E$  は、最初に開発し



**Figure 6**  
Si 2p core-level photoelectron spectra of Si(001)-2×1 measured with the ASMA and the DP-CMA using synchrotron radiation at 130 eV [9]. Fitting curves are also shown.

た EEICO 分光器のシングルパス CMA の  $E/\Delta E$  (~20) [9] から大きく改善されている。

**3-4. Si(001)2 × 1 清浄表面の表面 Si サイトの Si  $L_{23}VV$  オージェ電子 – Si 2p 光電子コインシデンススペクトル**

本 EEICO 装置の性能を評価するために、Si(001)-2×1 清浄表面の表面 Si サイトの Si- $L_{23}VV$ -Si-2p APECS 測定を行った。APECS シグナルの検出深さ ( $ED_{APECS}$ ) は、

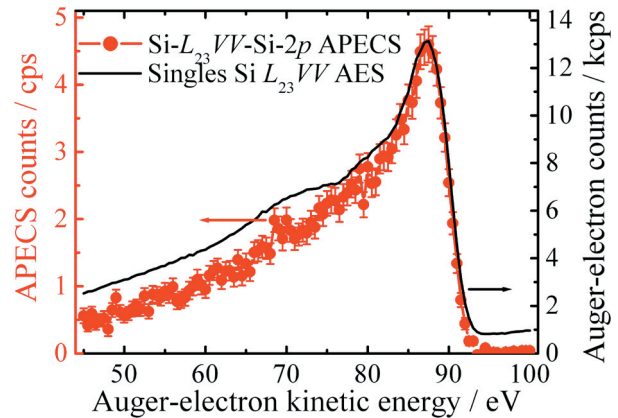
$$\frac{1}{ED_{APECS}} = \frac{1}{\mu_{PES}} + \frac{1}{\mu_{AES}}, \quad (8)$$

$$\mu_{PES} = \lambda_{PES} \cos\theta_{PES},$$

$$\mu_{AES} = \lambda_{AES} \cos\theta_{AES}$$

で与えられる [15]。ここで、 $\lambda_{PES}$  は光電子の非弾性平均自由行程 (Inelastic Mean Free Path, IMFP),  $\lambda_{AES}$  はオージェ電子の IMFP,  $\theta_{PES}$  は表面法線方向からの光電子の放出角度,  $\theta_{AES}$  は表面法線方向からのオージェ電子の放出角度である。今回の測定では、光電子の運動エネルギーは ~26 eV であるから  $\lambda_{PES}$  の実験値は ~3.3 Å [16], 85 eV のオージェ電子の  $\lambda_{AES}$  は、田沼らによって考案された TPP-2 式 [17] を用いると ~4.9 Å である。また今回の測定では、 $\theta_{PES}$  は  $37.5 \pm 4^\circ$ ,  $\theta_{AES}$  は  $59.5 \pm 11.5^\circ$  であることから  $ED_{APECS}$  は ~1.2 Å となる。このため、本 EEICO 装置による APECS は従来の光電子分光、オージェ電子分光よりもはるかに表面敏感であり、表面 Si サイトの Si- $L_{23}VV$ -Si-2p APECS 測定、Si-2p-Si- $L_{23}VV$  PEACS に適している。

Fig. 7 の赤丸は、Fig. 6b の S' 成分の Si  $2p_{3/2}$  ピーク位置の光電子とコインシデンスを取って測定した Si(001)-2×1 清浄表面の Si- $L_{23}VV$ -Si-2p APECS である。また、黒の実線



**Figure 7**  
The filled-circles and the solid line represent Si- $L_{23}VV$ -Si-2p APECS of Si(001)-2×1 at  $h\nu = 130$  eV [9]. The solid-line represents singles AES. The accumulated time at each datum was 300 s.

はシングルス AES である。シングルス AES と比較すると Si- $L_{23}VV$ -Si-2p APECS は、

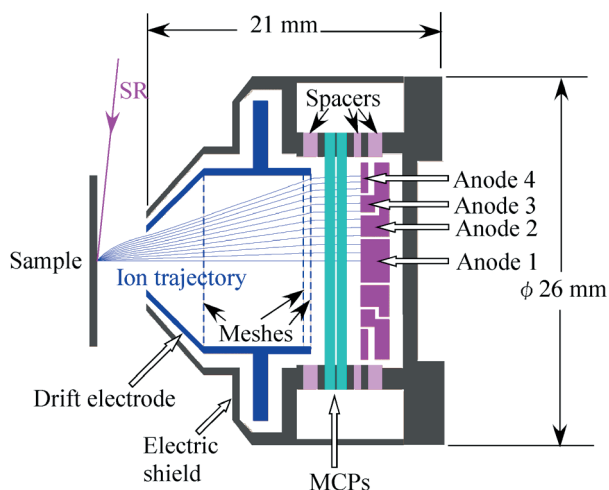
- 1) Si  $L_{23}VV$  AES のバックグラウンドを形成する 2 次電子がほとんど現れない (特に、 $KE > 93$  eV,  $KE < 65$  eV のエネルギー領域で顕著),
- 2) Si  $L_{23}VV$  AES ピークの線幅が細くなっている,
- 3)  $KE = 65-75$  eV 領域のプラズモン損失ピークの強度が弱くなっている, などの特徴が明瞭に現れている。これらの結果は以下のように説明できる。

- 1) 2 次電子はトリガーシグナルの Si 2p 光電子と相関がないため APECS には現れない。
- 2) 通常のオージェ電子スペクトルはすべての光電子に対応するのに対し、Si- $L_{23}VV$ -Si-2p APECS は特定の光電子放出に対応するオージェ電子のみを測定するので、ピーク幅が狭くなる [18]。
- 3) 表面最上層から放出されたオージェ電子がプラズモンを励起する確率は低いので APECS ではプラズモン損失ピークも抑制される [19]。

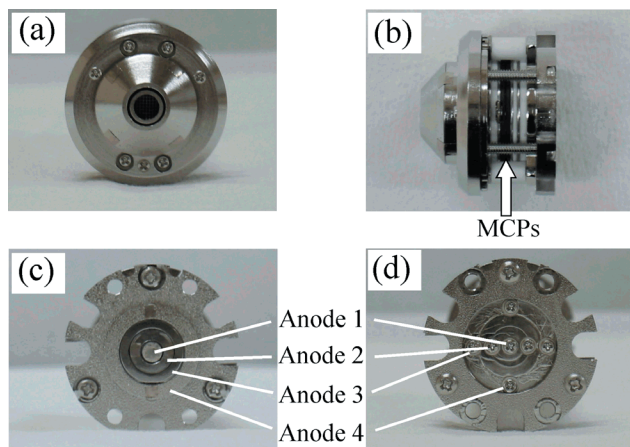
また、APECS シグナル計数率は最大で 4.5 cps 程度で、Fig. 7 の APECS 測定時間は 9 時間 15 分程度であった。この条件であれば清浄表面を十分維持できるので、測定時間として妥当である。

**4. 電子 – 極角分解イオンコインシデンス分光装置の開発**  
**4.1. 極角分解ミニチュア飛行時間型イオン質量分析器の開発**

従来の角度分解型イオン検出器の多くは画像読出型 MCP を用いており、電子刺激脱離イオン角度分布 (Electron stimulated desorption ion angular distribution, ESDIAD) 測定による表面分子の配向研究などに応用されている [3]。しかしながら画像読出型 MCP の外径は通常 50 mm 以上であり、同軸対称鏡型電子エネルギー分析器内の空間には収まらない。また、EICO 分光に応用するためには、検出時間、検出位置の情報を高速で読み出す必要があるため、測定系が極めて複雑になる。そこで我々は 4 分割アノード型のミニチュア極角分解 TOF-MS を開発した。本 TOF-MS は、極

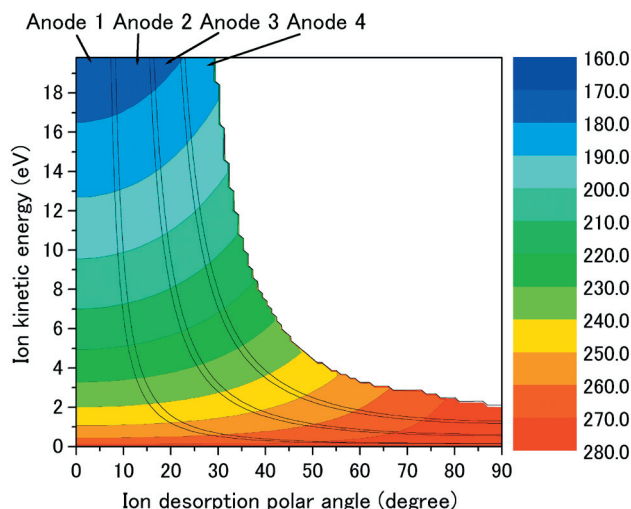


**Figure 8**  
 Cross section of a polar-angle-resolved miniature TOF-MS with four anodes [11]. The TOF-MS consists of a shield for the electric field, an ion drift electrode with three meshes, and MCPs with four concentric anodes. Trajectories of ions with a kinetic energy of 3.5 eV from a pointed source are shown for the desorption polar angles of 0° ~ 55° with a 5° step based on a simulation using SIMION (Ver. 7.0). The voltage of the sample is 0 V, that of the drift electrode is -30 V, and that of the MCPs entrances is -2000 V. The distance between the sample and the top of TOF-MS is 3.5 mm.



**Figure 9**  
 (a) Front and (b) Side view of a polar-angle-resolved miniature TOF-MS with four concentric anodes. (c) Front and (d) Rear view of the four concentric anodes [11].

角分解能は劣るが、コンパクトで低コスト、従来の EICO 測定系をそのまま用いることができる、という利点をもつ。我々が開発した EICO 分光用極角分解飛行時間型イオン質量分析器の断面図を Fig. 8, 写真を Fig. 9 に示す。最も内側のアノード 1 は外径 φ3.0 mm であり、次に内側に位置するアノード 2 は内径 φ3.4 mm, 外径 φ6.4 mm, 次のアノード 3 は内径 φ6.8 mm, 外径 φ9.2 mm, 最も外側のアノード 4 は内径 φ9.6 mm, 外径 φ13.8 mm, である。この極角分解 TOF-MS は特注の MCP (浜松ホトニクス, MCPA3, F4655 のアノードと基板を改造したもの) を用いて製作した。SIMION 3D version 7.0 によって求めた等電位面と点源からのイオン軌道も Fig. 8 に示した。この単一アノード型 TOF-MS によって検出される H<sup>+</sup> の TOF の脱



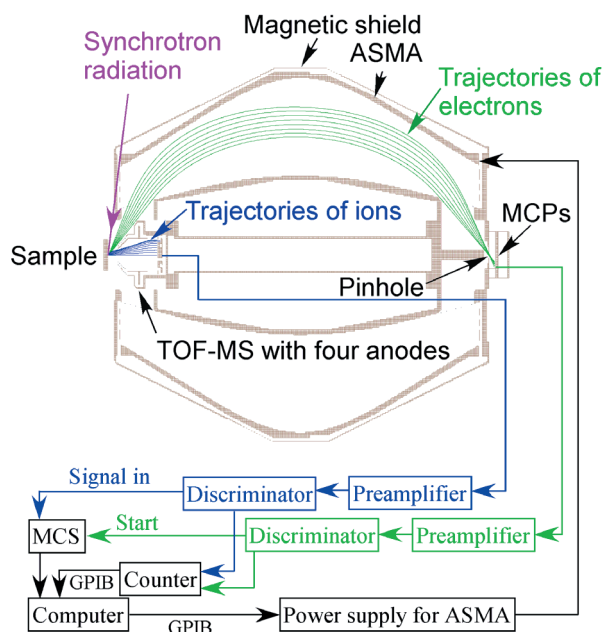
**Figure 10**  
 TOF contour map of H<sup>+</sup> for a polar-angle-resolved miniature TOF-MS with four anodes as a function of the desorption polar angle and kinetic energy of desorbed ions [11]. The geometry and the electrode voltages are the same as those in Fig. 8.

離極角、運動エネルギー依存性を示す等高線図を Fig. 10 に示す。この図は、ドリフト電極電位をパラメータとして各アノードについてコインシデンスイオンの TOF を測定すれば、脱離極角と運動エネルギーに関する情報が得られることを示している。また、試料とイオン引き込み電極間の電場を乱さないために、凹凸がほとんどない構造を持つシリコン単結晶試料ホルダー [13] を使用した。

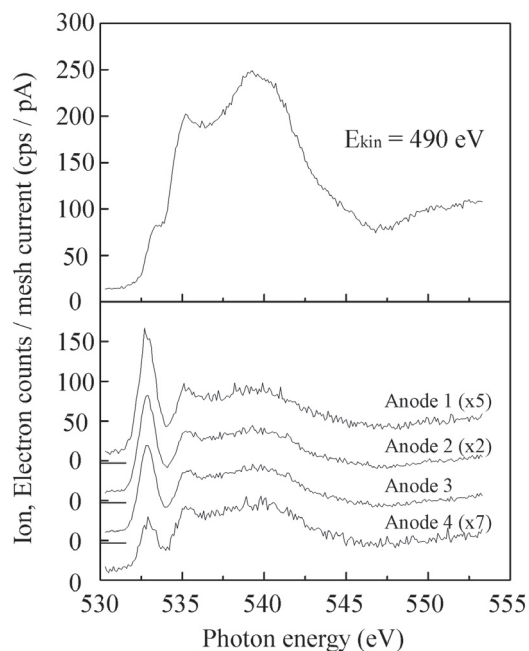
#### 4-2. 極角分解イオン収量分光

4 分割アノード型極角分解 TOF-MS を同軸対称鏡型電子エネルギー分析器に組み込んで製作した電子-極角分解イオンコインシデンス分光装置を Fig. 11, Fig. 12 に示す。本装置の特長は、①内殻励起終状態あるいはオージェ終状態を選別してイオンの脱離極角と運動エネルギーを見積もることができる、②脱離極角から脱離に寄与する表面分子種を選別できる。例えば、フッ素で終端された Si(111) 表面最上層の SiF からの F<sup>+</sup> は表面法線方向に脱離するのに対し、Si(111) 表面最上層の SiF<sub>3</sub> からの F<sup>+</sup> は傾いた方向に脱離するので識別できる。③脱離極角によってイオン脱離機構がどのように異なるかを研究できる、の 3 点である。

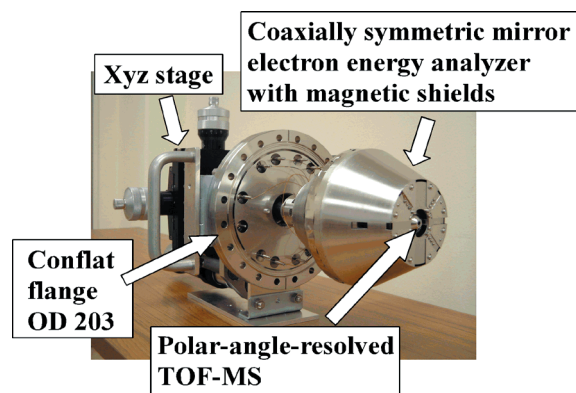
我々は PF-BL8A にこの装置を設置して、Si(111) 基板上に凝縮した H<sub>2</sub>O に hv = 533.4 eV の軟 X 線放射光を照射し、4a<sub>1</sub> ← O 1s 共鳴励起に由来する H<sup>+</sup> 脱離を測定した。凝縮 H<sub>2</sub>O はこれまで開発された EICO 分光装置すべての調整、性能評価に用いている試料であり、H<sup>+</sup> 脱離機構も詳しく調べられている [5, 6]。凝縮 H<sub>2</sub>O の全イオン収量 (total ion yield, TIY, H<sup>+</sup> 収量に相当)、オージェ電子収量 (Auger electron yield, AEY) スペクトルを Fig. 13 に示す。放射光は表面法線方向より 84° で入射、p 偏光である。従来の角度分解イオン収量スペクトルはイオン検出器を試料まわりに回転する方式で測定されているが、極角分解型イオン検



**Figure 11**  
 Cross section of electron polar-angle-resolved-ion coincidence analyzer [11], which consists of an ASMA and a miniature polar-angle-resolved TOF-MS with four anodes. Trajectories of electrons with a kinetic energy of 181.6 eV from a pointed source are shown for the desorption polar angles of  $48.2^\circ \sim 65.7^\circ$  with a  $2.5^\circ$  step based on a simulation using SIMION (Ver. 7.0). The voltage of the sample and the inner electrode of the ASMA is 0 V and that of the outer electrode of the ASMA is -100 V.



**Figure 13**  
 Auger electron yield (electron kinetic energy is 490 eV) and total ion yield spectra with anodes 1, 2, 3, and 4 for condensed  $H_2O$  [11]. The step of photon energy was 0.1 eV and each datum was recorded over 5 s. The voltage of the sample was 0 V, that of the drift electrode was -30 V and that of the MCPs entrance was -2000 V.

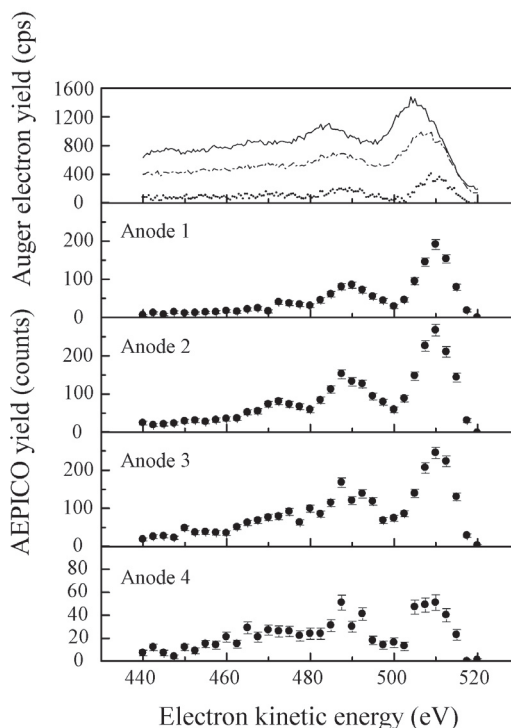


**Figure 12**  
 Photograph of an electron polar-angle-resolved-ion coincidence analyzer [11].

出器を用いると、イオン脱離収量スペクトルの脱離極角依存性を一度に測定できるというメリットがある。

**4-3. 電子-極角分解イオンコインシデンス分光**

$O 1s$  イオン化 ( $h\nu = 546.9$  eV) および  $4a_1 \leftarrow O 1s$  共鳴励起 ( $h\nu = 532.9$  eV) におけるオージェ電子スペクトル (AES) と、 $4a_1 \leftarrow O 1s$  共鳴励起における  $H^+$  のオージェ電子-光イオンコインシデンス (Auger-electron photoion coincidence, AEPICO) スペクトルを Fig. 14 に示す。 $4a_1 \leftarrow O 1s$  共鳴励起における AES から  $O 1s$  イオン化における AES を差し引いて求めた傍観型 AES も併せて示す。極角



**Figure 14**  
 Normal Auger electron spectrum at  $O 1s$  ionization ( $h\nu = 546.9$  eV, solid line), a resonant AES at  $4a_1 \leftarrow O 1s$  ( $h\nu = 532.9$  eV, dash-dot line), a spectator AES (dotted line) and  $H^+$  Auger electron photoion coincidence ( $H^+$  AEPICO) spectra at the  $4a_1 \leftarrow O 1s$  resonance with anodes 1, 2, 3, and 4 (solid circles) [11]. The time required to obtain each datum for the AEPICO spectrum was 690, 450, 450, and 690 s for anodes 1, 2, 3, and 4, respectively. The electrode voltages and the distance between the sample and the top of TOF-MS were the same as those of Fig. 13.

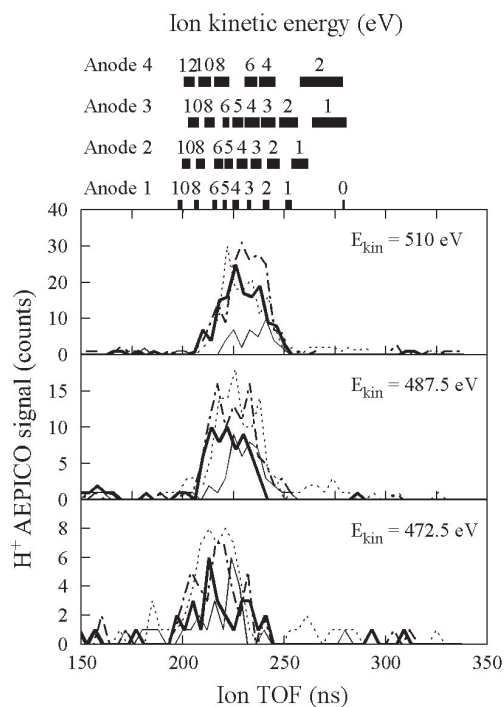
分解 H<sup>+</sup> AEPICO スペクトルのピーク位置が傍観型 AES のピーク位置と一致していることから、4a<sub>1</sub> ← O 1s 共鳴励起においてはいずれの脱離極角においても傍観型オージェ電子過程を経由した H<sup>+</sup> 脱離 [5, 6] が支配的であることがわかる。H<sup>+</sup> AEPICO スペクトルの最も強いピーク（オージェ電子エネルギー：510 eV）の相対強度は、アノード 1 > アノード 2 > アノード 3 > アノード 4 の順であった。一方、2 番目、3 番目に強いピークは脱離極角が増すほど強度が増大した（アノード 1 < アノード 2 < アノード 3 < アノード 4）。このような違いは H<sup>+</sup> 脱離機構あるいは H<sup>+</sup> 脱離確率が脱離極角に依存することを示している。

#### 4-4. オージェ電子- H<sup>+</sup> 飛行時間スペクトル

4a<sub>1</sub> ← O 1s 共鳴励起におけるオージェ電子- H<sup>+</sup> 飛行時間スペクトルを Fig. 15 に示す。脱離 H<sup>+</sup> の運動エネルギーも併せて示した。このイオン脱離エネルギーは、共鳴励起後の (O 1s)<sup>-1</sup> (4a<sub>1</sub>)<sup>1</sup> 状態およびオージェ過程後の (valence)<sup>-2</sup> (4a<sub>1</sub>)<sup>1</sup> 状態のポテンシャルエネルギー曲面を反映しており、4a<sub>1</sub> ← O 1s 共鳴励起誘起 H<sup>+</sup> 脱離機構に関して重要な知見を与える [20]。

#### 5. おわりに

電子-電子-イオンコインシデンス分光装置の開発により、表面の内殻励起からオージェ過程を経由してイオン脱離に到るダイナミクスを総合的に研究できるようになった。さらに、微小な表面ケミカルシフトの違いを利用して特定表面サイトの局所電子状態研究を行なうことが可能に



**Figure 15**  
Auger electron photoion time-of-flight difference spectra with anodes 1 (thick solid lines), 2 (dash-dot lines), 3 (dotted lines), and 4 (thin solid lines) at the 4a<sub>1</sub> ← O 1s resonance of condensed H<sub>2</sub>O [11].

なった。また、電子-極角分解イオンコインシデンス分光器の開発によってオージェ終状態を選別して脱離イオンの収量、質量、脱離極角、運動エネルギーに関する情報が得られるようになった。2つの装置はPFにおいてユーザーの共同利用に供しているため、使用を希望される方は間瀬まで連絡されたい。

#### 謝辞

電子-電子-イオンコインシデンス分光装置開発は橋本章吾氏（横浜国立大学大学院工学府修士課程を2009年3月に修了）、藤田斉彦氏（横浜国立大学大学院工学府修士課程を2008年3月に修了）、田中正俊教授（横浜国立大学大学院工学府）奥沢誠教授（群馬大学教育学部大学院）との共同研究である。また、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業個人型研究（研究領域「構造機能と計測分析」）および平成19-20年度高エネルギー加速器研究機構共同開発研究の助成を受けた。APECS測定は、高エネルギー加速器研究機構放射光共同利用実験課題2006S2-002のもとに行われた。電子-極角分解イオンコインシデンス分光装置開発は南部英氏（2004年4月～2005年3月まで物構研ポスドク、現在日立基礎研研究員）、漁剛志氏（広島大学大学院理学研究科博士課程を2003年3月に卒業、2000年4月-2002年10月KEK-PF特別利用研究員、現在山口県立山口博物館学芸員）、田中健一郎教授（広島大学大学院理学研究科、現在名誉教授）、森正信氏（千葉大学大学院自然科学研究科修士課程を2004年3月に卒業、現在トヨタ自動車（株））、奥平幸司准教授（千葉大学工学部）、上野信雄教授（千葉大学工学部）との共同研究である。また、科研費（11222206, 12555007, 14540314）などの助成を受けた。また、Figs. 2-7は日本真空協会の許可を受け、文献[10]から転載した。Fig.8-15はAIPの許可を受け、文献[11]から転載した。

#### 引用文献

- [1] DIET-I-V (Springer, Berlin, 1983-1993); DIET-VI, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., **B 101**, 1(1995); DIET-VII, Surf. Sci. **390**, 1(1997); DIET-VIII, Surf. Sci., **451**, 1(2000); DIET-IX, Surf. Sci. **528**, 1 (2003); DIET-X, Surf. Sci. **593**, 1(2005). DIET (Desorption Induced by Electronic Transitions, 電子遷移誘起脱離)は2年半おきに開催される国際的なワークショップであり、そのプロシーディングスとして上記の10冊が刊行されている。
- [2] T. E. Madey, Surf. Sci. **299/300**, 824 (1994).
- [3] R. D. Ramsier and J. T. Yates, Jr., Surf. Sci. Rep. **12**, 243 (1991).
- [4] K. Mase, E. Kobayashi, and K. Isari: in Correlation Spectroscopy of Surfaces, Thin Films and Nanostructures, Edited by J. Berakdar and J. Kirschner (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004.) Chap. 16, pp. 206-225.

- [5] K. Mase, S. Tanaka, S. Nagaoka, and T. Urisu, Surf. Sci. **451**, 143 (2000).
- [6] K. Mase, M. Nagasono, S. Tanaka, T. Sekitani, and S. Nagaoka, Fizika Nizkikh Temperatur **29**, 321, (2003). (Low Temperature Phys. **29**, 243 (2003)).
- [7] E. Kobayashi, K. Mase, A. Nambu, J. Seo, S. Tanaka, T. Kakiuchi, K. K. Okudaira, S. Nagaoka, and M. Tanaka, J. Phys.: Condens. Matter **18** S1389 (2006).
- [8] T. Kakiuchi, E. Kobayashi, N. Okada, K. Oyamada, M. Okusawa, K. K. Okudaira, and K. Mase, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **161**, 164 (2007).
- [9] 垣内拓大, 橋本章吾, 藤田齊彦, 間瀬一彦, 田中正俊, 奥沢 誠, J. Vac. Soc. Jpn. **51**, 749 (2008).
- [10] 小林英一, 漁剛志, 森正信, 間瀬一彦, 奥平幸司, 田中健一郎, 上野信雄, 真空 **47**, 14 (2004).
- [11] E. Kobayashi, A. Nambu, K. Mase, K. Isari, K. Tanaka, M. Mori, K. K. Okudaira, and N. Ueno, Rev. Sci. Instrum. **80**, 043303 (2009).
- [12] K. Siegbahn, N. Kholine, and G. Golikov, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **384**, 563 (1997).
- [13] 小林英一, 南部 英, 垣内拓大, 間瀬一彦, 真空 **50**, 57 (2007).
- [14] E. Landemark, C. J. Karlsson, Y.-C. Chao, and R. I. G. Uhrberg, Phys. Rev. Lett. **69**, 1588 (1992).
- [15] G. A. Sawatzky: in Auger Electron Spectroscopy, edited by C. L. Briant and R. P. Messmer (Academic, 1988) chapter 5.
- [16] F. J. Himpsel, F. R. McFeely, A. Taleb-Ibrahimi, J. A. Yarmoff, and G. Hollinger, Phys. Rev. B **38**, 6084 (1988).
- [17] S. Tanuma, C. J. Powell, and D. R. Penn, Surf. Interface Anal. **17**, 911 (1991).
- [18] E. Jensen, R. A. Bartynski, S. L. Hulbert, E. D. Johnson, and R. Garrett, Phys. Rev. Lett. **62**, 71 (1989).
- [19] W. S. M. Werner, W. Smekal, H. Störi, H. Winter, G. Stefani, A. Ruocco, F. Offi, R. Gotter, A. Morgante, and F. Tommasini, Phys. Rev. Lett. **94**, 038302 (2005).
- [20] A. Nambu, E. Kobayashi, M. Mori, K. K. Okudaira, N. Ueno, and K. Mase, Surf. Sci. **593**, 269 (2005).

<sup>a</sup> 現在の所属は愛媛大学理学部化学科

(〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5)

<sup>b</sup> 現在の所属は佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター  
(〒 841-0005 佐賀県鳥栖市弥生が丘 8-7)

## PF トピックス一覧 (7月～9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)。それを受けて、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。

2009年7月～9月に紹介された PF トピックス一覧

- 07.02 インド科学技術省による専用放射光ビームラインの運営会議が開催されました。
- 07.24 ERL サイエンスワークショップ開催
- 08.06 ミクロな磁石のフシギな姿 ～ X線による磁気八極子の直接観測 ～
- 09.08 富田文菜研究員ロレアル - ユネスコ女性科学者日本奨励賞受賞
- 09.10 「この日限定」を満喫～ KEK 一般公開 ～
- 09.17 加速器科学がつなぐアジア ～ 急速に台頭するアジアンパワー ～

### 新しく博士課程に進級された学生さんへ PF ニュースであなたの修士論文を紹介しませんか？

この度 PF ニュースでは、新しく博士課程に進級された学生さんの修士論文の研究内容を紹介するコーナーを設けることにし、PF で頑張って実験されている博士課程の学生さん自身の紹介、また、その研究内容がアピール出来る場を提供することにしました。

我こそはという博士課程の学生さんは、ぜひ下記のフォーマットに従い、あなたの修士論文の研究を紹介して下さい。また博士課程の学生さんが所属される研究室の指導教員の方は、学生さんに PF ニュースへの投稿を勧めて頂ければ幸いです。

**【投稿資格】** PF/PF-AR のビームラインを利用した研究に関する修士論文を執筆し、修士を取得した方。

**【投稿フォーマット】**

1. 修士論文タイトル
2. 現所属、氏名、顔写真
3. 修士号取得大学
4. 実験を行ったビームライン
5. 論文要旨 (本文 650 文字程度)
6. 図 1 枚

**【原稿量】**

図とテキストで刷り上り最大 1 ページ (2 カラム)。

**【提出物・提出方法】**

文字データと図表データをメール添付で PF ニュース編集委員会事務局・高橋良美 ([pf-news@pfqst.kek.jp](mailto:pf-news@pfqst.kek.jp)) までお送り下さい。