

## 光電子顕微鏡

木下 豊彦<sup>1</sup>, 春山 雄一<sup>2</sup><sup>1</sup>東京大学物性研究所附属軌道放射物性研究施設つくば分室\*, <sup>2</sup>姫路工業大学高度産業科学技術研究所

## Photoelectron Spectromicroscopy

Toyohiko KINOSHITA<sup>1</sup> and Yuichi HARUYAMA<sup>2</sup><sup>1</sup>Synchrotron Radiation Laboratory, Tsukuba-Branch, Institute for Solid State Physics, University of Tokyo<sup>2</sup>Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, Himeji Institute of Technology

Photoelectron spectromicroscopy is combined technique of photoelectron spectroscopy and electron microscopy. To achieve higher spatial- and energy resolutions, a variety of technical approaches have been developed. Especially at the 3<sup>rd</sup> generation synchrotron radiation facility in the world, photoelectron spectromicroscopy becomes key science. Element specific imaging, magnetic domain imaging may become possible especially under real time observation. Study of electronic structure of very small samples, single domain of inhomogeneous surfaces, and artificial surfaces such as quantum dots may become possible, too. We have performed photoelectron spectromicroscopy experiments at the UVSOR and the BESSY. We are also starting the photoelectron emission microscope experiments at the Photon Factory. Some of the results and the future plan related to these projects are introduced.

## 1. はじめに

物質を観察するときできるだけ細かく見たいというのは当然の要求であり、これまでに光学顕微鏡を始め、いろいろな観察方法で顕微鏡的な手法が可能になってきている。光電子分光の分野でも古くからいろいろな試みがなされ、特に最近では、ALSやELETTRAといった第3世代の放射光源施設において先進的な装置が稼働を始めている。高輝度光源施設としては比較の後発のBESSY IIにおいても、SMARTという、LEEMと共用で使える光電子顕微鏡装置が開発され、まもなく世界のトップに立とうとしている<sup>1)</sup>。

翻って日本の状況を省みると、日本電子 & 東大 & 千葉大のグループが準安定原子を励起源とする場合が中心ではあるが、電子分光と顕微鏡観察が可能な装置を開発したり<sup>2)</sup>、島津製作所やアルバックファイ<sup>3)</sup>などの会社は、独自にマイクロESCAと呼ばれる装置を販売しており、また、理研の宗像らはレーザー光を励起光源とした光電子顕微分光装置を開発している<sup>4)</sup>。本特集号で執筆されている先生方の他にも、筑波大の青木グループなど光学素子でマイクロビームを作る分野で最先端の技術を持っているグル

ープは多い。にもかかわらず、放射光の分野では、我々の他に、PF-BL16Bで、尾嶋グループを中心に光電子顕微鏡装置が組み立てられ、予備的な成果を得たり、日立グループが同様にPFで実験を試みたり<sup>5)</sup>、本号でも紹介されているように阪大の菅グループがドイツのグループとの共同研究としてSPring8で磁区観察を行ったり、といった程度で、ユーザーの潜在的な能力や需要の割にはまだまだ盛んな実験とはいえないようである。筆者の独断と偏見でこの理由を以下のように考察させていただく。まず、第一に、アンジュレータ光源の不足がある。我が国では待望久しい第3世代の高輝度光源の建設がまだ現実のものとはなっていない。PFの軟エックス線領域アンジュレーターの大部分はエックス線ユーザーとのタイムシェアを余儀なくされている。5本のアンジュレータのうち、BL2とBL19のものだけが軟エックス線専用である。従って必然的にビームタイムの混み具合は相当なものであり、割り当てられる1回あたりのビームタイムの日数もさほど長くない。後で述べる、光を絞るタイプの顕微鏡実験では、光学素子や装置の配置調整に相当の労力と時間を割かねばならず、実際に実験ができるのはわずかだけといったことに

\* 東京大学物性研究所附属軌道放射物性研究施設つくば分室 〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1, KEK-PF 内  
TEL: 0298-64-2489 FAX: 0298-64-2461 E-mai: toyohiko@issp.u-tokyo.ac.jp

もなりかねない。苦勞の割には実入りが少ないというのが一つの理由であろう。第2の理由は、STM や、SEM といった、現在では一般的になった顕微鏡に比べると、空間分解能が及ばない点がある。研究目的が単なるイメージの観察のみであれば、実験室で手軽にできる STM や SEM などが圧倒的に有利であろう。光電子顕微鏡ならではの長、すなわち、Element specific な imaging が可能であること、電子状態 (スペクトル) を観測できることを生かした研究をどう展開していくかは、この分野が抱えている世界的な課題でもある。ここではせっかく執筆の機会を与えていただいたので、我々が行ってきたり、計画している光電子顕微鏡実験の一端を紹介させていただきたい。

## 2. 光電子顕微鏡実験装置

光電子顕微鏡は主に2種類の方法によって実現されている。一つは、鏡やゾンプレートを用いて縮小光学系をくみ、光を絞ってマイクロビームを作ってやり、電子分光器は通常のものを用いる手法である。光電子のイメージングを行うために、試料を光の周りで動かし (走査し) てやることから、走査型の光電子顕微鏡とも呼ばれる。もう一方の手法は電子レンズまたは磁場レンズによって、光電子の像を拡大する手法である。

縮小光学系を使う走査型顕微鏡の場合、光学素子としては、楕円鏡、Wolter鏡、Kirkpatrick-Baez配置鏡、Schwarz-schild鏡、ゾンプレート、キャピラリーなどが用いられる。光学素子のQualityが空間分解能などの装置の性能を決める。光電子分析だけでなく、いろいろなプローブを顕微鏡として用いることができる利点がある。一方、光学素子が必然的に試料に近接するため、実験条件に制限が課せられる場合も多い。また、Schwarz-schild鏡やゾンプレートでは、空間分解能は比較的あげやすいものの、使用できる光エネルギー範囲に制限があることが、放射光のメリットを生かしきれないという欠点となっている。通常分光器の出射スリットまたはその後ろに取り付けたアパーチャーを光源点とするため、スリットから下流の装置を一体の光学系と考えた調整機構を必要とし、成果を上げている世界の装置の大部分はビームラインに常駐しているものが多い。

PEEM (Photoelectron Emission Microscope) は、真空紫外線や軟エックス線を試料表面に照射した際の光電子像を電子レンズによって拡大し、MCPで増幅し、蛍光スクリーン上でその像を観察するものである。出てくる光電子の大部分は光励起の後様々な過程を経てエネルギーを失った2次電子であり、表面の仕事関数の違いや、軟エックス線励起の場合には吸収係数の違いによってImageにコントラストが現れる。放射光を用いて内殻状態を選別した像を得たり、磁気2色性を使って磁区ドメインの観察を行ったりする研究が進んでいる。1組の電子レンズは3枚の円筒型の電極からなり、それをいくつか組み合わせて、

projective lens, objective lens としている。初段の objective lens にかけてられる高電圧は数 kV/mm の電位勾配を持つように設計されている。市販のものがいくつかあり、現在では数十 nm の空間分解能が当たり前となっており、近い将来数 nm に達するものも現れるであろう。走査型と比べると、高電圧を扱うため、試料周りの突起に注意する必要があるが、十分強い励起光の場合には real time imaging が可能で、表面における反応や結晶成長の様子、磁区の移動などの観察に応用されている。Figure 1 に我々が東大物性研つくば分室 (物構研 PF 内) で立ち上げを進めている PEEM 装置の写真を示す。PEEM 本体はドイツの Staib 社製のもので、分解能 40 nm での imaging が可能である。後に紹介する BESSY でのデータもこの装置と基本的には同じもので測定している。現在は水銀 UV ランプを使って調整を進めているが、装置を PF 内のいろいろなビームラインに接続して使えるよう設計してある。また、試料マニピュレーターと PEEM は、放射光の軸の周りで回転が可能で、偏光特性を利用した研究にも対応できるようになっている。写真を見ていただくとわかるが、PEEM 本体から枝分かれしているように見える部分がある。この中には Cylindrical mirror analyzer が設置されており、以下に述べるマイクロ ESCA 同様、PEEM によって観測された特定の微小領域 (空間分解能約 1  $\mu\text{m}$ , エネルギー分解能約 0.4 eV) の光電子スペクトルが測定できるようになっている。

光電子分析器に電子レンズがついている場合、そもそも光電子顕微鏡的な使い方が可能である。古くからマイクロ ESCA として、微小領域の化学分析に用いられてきた。放射光施設では、7, 8 年ほど前に Heidelberg 大学のグループが BESSY に VG 社の ESCASCOPE<sup>5)</sup> と名付けられた装置を持ち込んだ<sup>7)</sup>。この装置の特徴は微小領域の光電



Figure 1. The PEEM equipment constructed at the SRL-ISSP Tsukuba branch (PF). The mercury UV light is attached for the adjustment of the equipment.

子スペクトルが行えるだけでなく、光電子のエネルギーを半球分析器（軌道半径150 mm）で選別した後、その空間分布を同時にスクリーン上に写し出せることにある。PEEMでの化学分析は放射光のエネルギー可変性によって、マイクロ ESCA の化学分析マップは光電子のエネルギーで行える。Schneider らが、内殻光電子スペクトルや Auger 電子スペクトルに現れる磁気円二色性効果 (Magnetic Circular Dichroism; MCD) を利用して磁区観察を行った例が有名である<sup>8)</sup>。VG 社は ESCASCOPE に改良を加え、ESCALAB-220iXL と呼ばれる装置を開発した。UVSOR で我々が行った実験は、この装置を放射光で利用可能なように改良を加え、さらに試料表面の清浄化や蒸着などが容易に行える装置を取り付けて行っている<sup>9)</sup>。Figure 2 に ESCALAB-220iXL 電子分析器の模式図を示す。電子レンズの中には2つのアパチャーがあり、視野及び電子の入射角度を制限するようになっている。この装置には、試料の背後に磁場レンズも設置されており、電子レンズとの併用で、イメージングモード（アナライザー出口最終段の MCP & 蛍光スクリーンによる）の時には2  $\mu\text{m}$ 、半球出口直後に設置された6つのチャンネルトロンによるスペクトル測定モードの時で20  $\mu\text{m}$  の空間分解能を達成している。レンズにかかる電場やアパチャーの大きさの調整で、観測したい視野を設定できる。また、アナライザーの focal point に試料と光を合わせ込むために、拡大レンズ付きの CCD カメラがセットされており、TV モニターで確認しながら試料、チャンバーの位置を合わせる

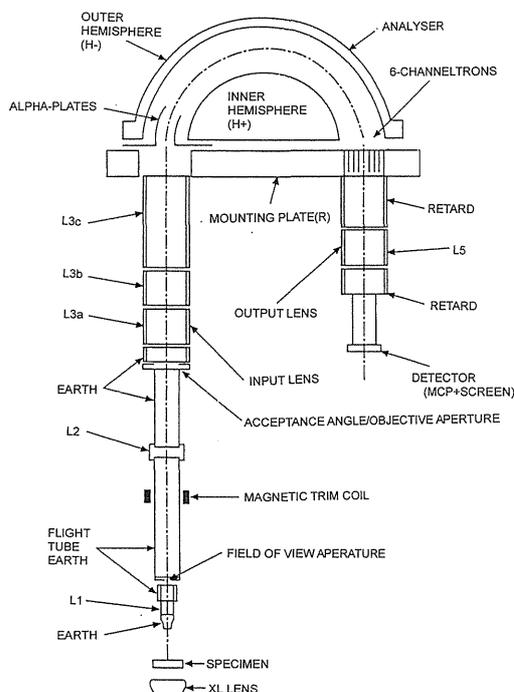


Figure 2. Schematic view of the ESCALAB 220i-XL analyzer. The XL lens is a magnetic lens installed behind the sample, which makes further magnification of the photoelectron image possible.

ことも可能になっている。

PEEM にしろマイクロ ESCA にしろ、原理的には絞った光を必要としないが、測定視野内にできるだけ強い光がきている方がよいことは言うまでもない。各地の高輝度光源施設でも縮小光学系と組み合わせたビームラインが建設されている。

### 3. 光電子顕微鏡を用いた研究

#### 3.1 レーザー光との組み合わせ分光

光電子顕微鏡では微小領域を観測できるため、レーザーのパワーを微小領域に集中し、その部分の測定を行う研究が試みられる。我々は UVSOR において、Nd-YAG レーザー光（波長1.064  $\mu\text{m}$ ）を光ファイバーによってチャンバーまで導き、レンズで1 mm $\phi$  以下に集光することで試料表面を局所的に加熱し、その電子状態を測定する試みを行った (Fig. 3(a))。電子衝撃法や直接通電を用いた加熱の場合には試料やその周りに電圧がかかるため、温度を上げた状態での光電子測定を行うのは困難である。従って、高温で相転移を起こした試料表面の測定のためにはさらに工夫が必要であり、たとえばかける電圧を数Hzから数十 Hz のパルスにしてやり、温度を保ちながらパルス電位がゼロのときのみにゲートを併せて光電子信号を測定する方法が必要である。このため、測定時間の半分程度は温度の維持のために使われ、貴重な放射光のビームタイムを大きく損失していることになってしまう。また、試料だけでなくその周りのさまざまな部品も放射熱や電子によって加熱され、真空が悪化したり、それによって試料表面が汚染されたり、装置がダメージを受けたりなどの弊害が起こる。レーザー加熱の場合には非常に局所的な加熱になるために、真空の悪化や試料以外の加熱の問題を防ぐことが可能である。また、電場をかける必要がないので、測定中試料を高温にすることも可能である。しかも、レーザービームはかなりしぼり込むことができるので我々の装置のレンズ系との干渉を心配する必要もない。一方光電子顕微鏡ではレーザー加熱された試料の、まさにその場所の観測が可能であるために、表面での温度の不均一性をあまり気にする必要がない。ヘリウムクライオスタットを利用した低温実験においてもいくつかのメリットが期待できる。通常ヘリウムクライオスタットで試料を冷却するためには熱接触を十分によくとる必要がある。試料クリーニングや、相転移研究のために試料を電氣的に加熱する際には逆に絶縁を大きくする必要があり、ホルダーの構造を複雑にする。これが試料を加熱するときには大きな熱容量となり、より大きなパワーを投入しなければならなくなる。真空も悪化するし、脱ガスした気体成分は冷やされている試料ホルダーや試料自身に再吸着し、表面汚染の原因にもなる。レーザーによって加熱する場合には試料ホルダーの電氣的絶縁を考える必要はなく、コンパクトにできるばかりでなく、局所的とはいえスムーズな温度上昇が可能になる

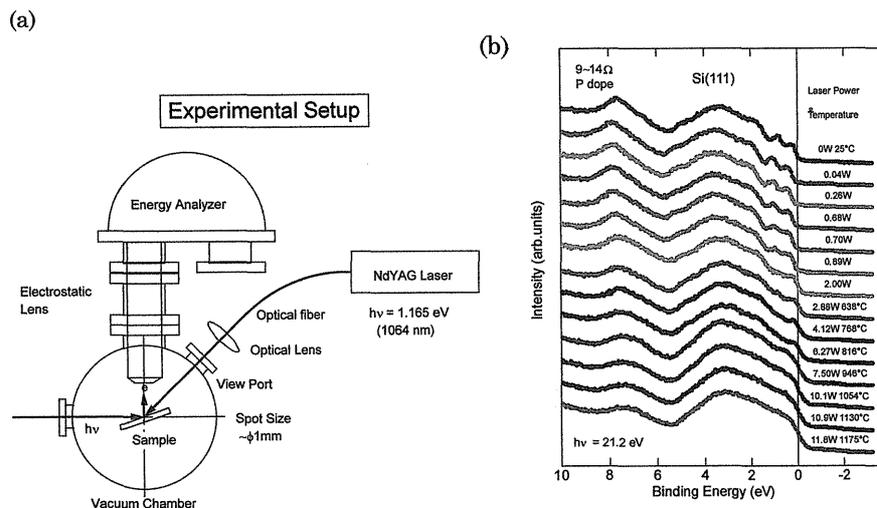


Figure 3. (a) Schematic view of the laser annealing system combined with ESCALAB 220i-XL at the UVSOR. (b) The temperature dependence of the photoelectron spectra in the valence band region for n-type Si (111) surface.

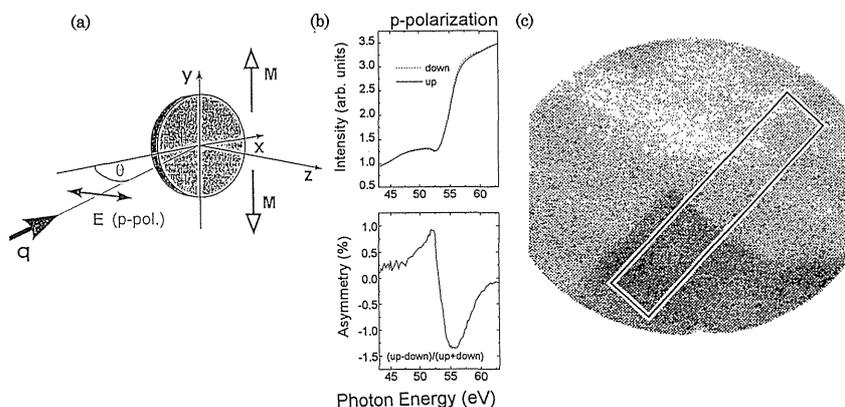


Figure 4. (a) Experimental geometry of MLDAD in photoemission, T-MOKE and new type of MLD of photoelectron yield. (b) The upper panel is Fe  $M_{2,3}$  photoelectron yield spectra at  $\theta=16^\circ$  with p-polarized light. The solid and dashed curves show the spectra for “M-up” and “M-down” respectively. The lower panel is the asymmetry signal obtained from the upper panel. (c) Difference image obtained at  $h\nu=52$  eV and 55 eV for Fe surface. The field of view is  $340 \mu\text{m}$  diameter.

ために低温から高温域までの実験に威力を発揮する。**Figure 3(b)**には Si(111)表面の価電子帯光電子スペクトルを示す<sup>10)</sup>。室温から融点直下までのスペクトルが非常にきれいとれており、その間3つの表面準位が変化している。また、レーザーパワーが少ないときには表面光電位が誘起され、スペクトルがシフトしている様子も分かる。

今回は、高温状態を測定するのに適した手法として紹介したが、もちろん、2光子測定を行う際にもレーザーパワーを効率よく集中することが重要である。現在 UVSOR では、こうした目的のためにこの装置を BL6A2 に移設する作業が進行している。

### 3.2 磁性体表面の観察

本特集号では MCD と組み合わせた PEEM によって磁

性マイクロ構造の研究を行った例も紹介されている。ここでは直線偏光でも磁区観察が行えるということを紹介しておきたい。**Figure 4(a)**に、p 偏光を試料表面に斜めから入射し、偏光の向きとは垂直に磁場をかけている図を示している。これは、Transverse 配置の magneto-optic Kerr effect を観測する場合と同じ実験配置であり、角度分解光電子測定を行うと MLDAD (Magnetic Linear Dichroism in Angular Distribution) と呼ばれる 2 色性が観測される配置でもある<sup>11)</sup>。当然このような配置で内殻光電子の MLDAD 信号が大きくなる条件で Imaging を行えば磁気コントラストを得ることは可能である<sup>9)</sup>。我々は同様の配置で、Fe(100)表面の光電子イールドスペクトルを測定し、Fe  $M$  吸収端において磁化の上下に対して、2 色性が現れることを新たに見いだした (**Fig. 4(b)**)<sup>12,13)</sup>。この 2 色性は入射角が表面にすれすれになればなるほど

顕著に現れる。Staub製のPEEMを用い、光エネルギー52 eVと55 eVでイメージを測定し、その差分をとって得たのがFig. 4(c)である。磁区ドメインの境界がはっきり観察されている。ここで光は図の左上方向から入射している。四角い枠内の強度のグラフ化もできるがここでは省略する。円偏光による磁区観察と組み合わせると、より完全な磁化方向に関する情報を得ることができる<sup>13,14</sup>。

こうした観察の特徴は、MFMやスピンSEMなどと比べ、Element specificな観察が行えることと、Real time観察が行える可能性があることであり、磁性薄膜での下地との磁氣的相互作用の研究や<sup>15</sup>、先ほどのレーザー加熱との組み合わせで温度による相転移や揺らぎの観察などに応用できる点にある。また空間分解能があがってきたことから、今後磁気量子ドットの観察や量子ドット内のMCD測定(磁気モーメントの決定)などの研究が発展することと思われる。我々も前述のPEEM装置を用いた研究を計画している。

### 3.3 微小試料の光電子顕微分光

これまで通常の光電子分光装置では、比較的大きな試料に対してのみ測定が行われてきたが、光電子顕微鏡装置を用いると数十から数百ミクロン程度の大きさの試料に対して光電子分光測定が容易に行える。試料合成の問題上、大きな試料を合成することができない試料は数多く存在するが、その中でも、我々は有機伝導体に注目して研究を行っている。その一例として、(DI-DCNQI)<sub>2</sub>M (M=Cu, Ag)の光電子分光実験を紹介する。

(DI-DCNQI)<sub>2</sub>M (M=Cu, Ag)の結晶構造は、金属イオンMをAgからCuに置換してもほとんど変化せず、DI-DCNQI分子が積み重なった一次元的なカラムとそのカラム間に位置する金属イオンMから構成される。その物性は金属イオンMにより大きく変化する。M=Agの場合は半導体な電気伝導を示し、擬一次元的であるのに対し、M=Cuの場合は金属な電気伝導を示し、一次元的な

性質が抑えられる。これらの物性の違いは、一次元的なDI-DCNQIカラムのpπ電子と金属イオンMのd電子との相互作用によることが示唆されている<sup>16,17</sup>。(DI-DCNQI)<sub>2</sub>M (M=Ag, Cu)の結晶は、大きい場合でも直径約200 μm程度の針状で、通常の光電子分光測定には小さすぎるため、それが直接的に軌道に関する電子状態を観測できる方法であるにもかかわらず、その実験は為されていない。我々は、光電子顕微鏡装置を用いることにより、(DI-DCNQI)<sub>2</sub>M (M=Ag, Cu)の電子状態を明らかにすることに成功した。(DI-DCNQI)<sub>2</sub>Agの光電子顕微鏡像をFig. 5(a)に示す。取り込む光電子の運動エネルギーをI 3d<sub>5/2</sub>に合わせている。真ん中の一番明るい直線部分が試料で、試料の背後は約φ1 mmのホールが空いており、その外側が試料ホルダーである。この図を見て分かるように典型的な試料の大きさは、~100 μm程度である。実験は、UVSORのBL5Bで行った。清浄表面は、超高真空中で酸化した表面を剃刀で削り取るにより得た。

(DI-DCNQI)<sub>2</sub>M (M=Ag, Cu)の価電子帯の光電子スペクトルをFig. 5(b)に示す。試料上のφ50 μmの空間領域から放出される光電子スペクトルを測定している。また、金属イオンMのd軌道の寄与が比較的大きい励起光エネルギーを選んで比較している。光イオン化断面積の励起光エネルギー依存性により、(DI-DCNQI)<sub>2</sub>M (M=Ag, Cu)におけるAg 4d, Cu 3d軌道はそれぞれ、結合エネルギー~5.2 eV, ~3.2 eVに位置していることが分かる<sup>18</sup>。DI-DCNQI分子のキノン環、シアノ基に由来するC, N 2p軌道は、~6.5 eV, ~4.0 eVに位置している。フェルミ準位近傍の光電子スペクトルを拡大して比較したのがFig. 5(b)の挿入図である。光イオン化断面積の励起光エネルギー依存性により、フェルミ準位近傍の構造は、主にC, N 2p軌道から成ると考えられる。これは、DCNQI分子のpπ軌道に対応する。今回測定された光電子スペクトルの比較では、(DI-DCNQI)<sub>2</sub>Cuの光電子スペクトルの強度が、(DI-DCNQI)<sub>2</sub>Agのものよりも大きいことを示し

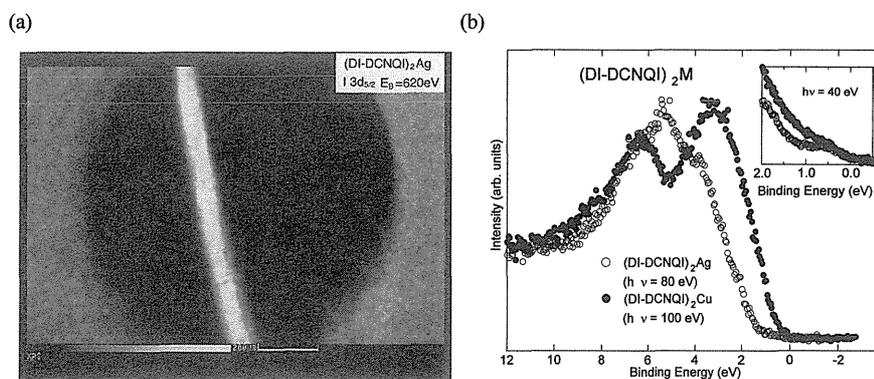


Figure 5. (a) Photoelectron image of (DI-DCNQI)<sub>2</sub>Ag excited by AlK $\alpha$  light. The I 3d<sub>5/2</sub> electrons at E<sub>B</sub>=620 eV were collected. (b) Photoelectron spectra of (DI-DCNQI)<sub>2</sub>M (M=Ag, Cu). In the inset, photoelectron spectra near the Fermi level of (DI-DCNQI)<sub>2</sub>Ag and (DI-DCNQI)<sub>2</sub>Cu are compared.

ている。この光電子スペクトルの強度の違いは Cu 3d 電子からの寄与と考えられる。Cu 3d 軌道は、 $\sim 3.2$  eV に中心を持つが、そのテールがフェルミ準位近傍まで及んでいるためであると考えられる。Ag 4d 軌道と Cu 3d 軌道を比べてみるとわかるように、Cu 3d 軌道のほうがフェルミ準位により近い結合エネルギー位置にある。これは、Ag 4d 軌道は、Cu 3d 軌道に比べて局在しており、Cu 3d 軌道のほうが DCNQI 分子の  $p\pi$  軌道との混成が生じやすいことを示している。これらの結果は、バンド計算の結果<sup>19)</sup>と定性的に良く一致している。また、Cu の場合でも、明瞭なフェルミエッジは観測されないが、次元性の低い物質に固有の現象が起きているのか、または表面の影響を原因として考えている。

このように光電子顕微鏡を利用すると微小試料の電子状態の解明に対して非常に強力な手法になることを示した。大部分の有機化合物は光による放射線損傷が生じるため、今回のように、弱くてしかも決して小さくないビーム (5 mm ぐらい) を使い、電子レンズを使って顕微分光を行う方式は、こうした物質に適した手法といえるであろう。我々は電荷移動錯体塩のひとつである、DMTSA-BF<sub>4</sub> などについても、その電子状態を解明し、電気伝導の機構を説明するための情報の一つとして、光電子顕微分光測定を行っている。一方、試料が十分に光照射に耐える物質であれば、今後、光のスポットを小さく絞っていき、高輝度化することにより、光電子顕微鏡による研究のさらなる発展が期待できる。また、今回の実験では苦勞して表面のクリーニングを行い、ようやく信頼性のあるデータを得たわけであるが、光電子分光は所詮表面近傍の情報を得ているにすぎないわけで、得られた結果が、本当にバルクの情報を反映しているという確証はない。今後放射光のエネルギーを上げ、よりバルク敏感な状態での光電子顕微分光実験を行ったり、現在物性研で立ち上げを行っている PEEM を用いて、光電子イールドによる吸収スペクトルを行うなどして、より総合的な立場から電子状態を議論する必要がある。

#### 4. おわりに

我々が最近行ってきた研究を中心に、放射光を利用した光電子顕微鏡について紹介させていただいた。ここに紹介した結果は、ドイツデュッセルドルフ大学の Kisker グループや、分子科学研究所時代に我々と研究をともにした、八木伸也氏 (現名古屋大)、渡辺正満氏 (現理研)、K. G. Nath 氏 (現 NTT)、Y. Ufuktepe 氏 (トルコチュクロワ大学)、木村真一氏 (現神戸大) らとの共同研究であり、その間 UVSOR のスタッフをはじめとする多くの方々にご協力いただいた。ここに感謝を申し上げたい。また、現在 PF で立ち上げを進めている装置は、東大物性研つくば分室の奥田太一氏、原沢あゆみ氏、東大尾嶋研究室の木原隆幸氏、小野寛太氏の努力に多くを依っている。本稿を読

んで研究に興味を持っていただいた方で、測定したい試料などお持ちの方は、声をかけていただければ幸いである。

放射光施設における光電子顕微鏡の課題は、如何に安定した性能を出すかにかかっているものと思われる。特に、収束光学系で光を絞って実験を行う装置の場合には、顕微鏡固有のビームラインの確保が必須であろう。空間分解能とともにエネルギー分解能の向上もめざましい。PEEM では、nm の領域に到達する勢いであるが、エネルギー分析を行う光電子顕微鏡の場合でも数十 nm の空間分解能で、しかも 0.1 eV のエネルギー分解能の実現が望まれる。STM と放射光を組み合わせるとより高分解能の光電子顕微鏡を実現しようという試みもいくつかのグループで進行中のようである。すなわち、表面に放射光または軟エックス線を照射し、STM のトンネル電流が散乱断面に依って増加する現象を利用するものである。今後、成果が出てくることが期待されている。

#### 参考文献

- 1) J. Electron Spectrosc. Rel. Phenom. 84 (1996) が光電子顕微鏡に関する特集号になっている。
- 2) Y. Harada, S. Yamamoto, M. Aoki, S. Masuda, T. Ichinokawa, M. Kato and Y. Sakai: Nature 372, 657 (1994).
- 3) 岩井秀夫, 田中彰博, 大岩 烈, P. E. Larson: ULVAC Technical Journal 42, 51 (1995).
- 4) 宗像利明: 日本物理学会誌 49, 26 (1994).
- 5) 二宮 健, 長谷川正樹: 表面科学 15, 524 (1994).
- 6) P. Coxon, J. Krizek, M. Humpherson and I. R. M. Wardell: J. Electron Spectrosc. Rel. Phenom. 52, 821 (1994).
- 7) K. Holdack and M. Grunze: Analytica Chimica Acta 297, 125 (1994).
- 8) C. M. Schneider, K. Holdack, M. Kinzler, M. Grunze, H. P. Oepen, F. Schafers, H. Petersen, K. Meinel and J. Kirschner: Appl. Phys. Lett. 63, 2432 (1993).
- 9) T. Kinoshita K. G. Nath, Y. Haruyama, M. Watanabe, S. Yagi, S. Kimura and A. Fanelas: J. Electron Spectrosc. Rel. Phenom. 92, 165 (1999).
- 10) Y. Haruyama, T. Kinoshita, S. Tanaka, H. Makino, K. Wada and S. Matsui: UVSOR Activity Report 1999, p. 128.
- 11) Ch. Roth, F. U. Hillebrecht, H. B. Rose and E. Kisker: Phys. Rev. Lett. 70, 3479 (1993).
- 12) T. Kinoshita, H. B. Rose, Ch. Roth, D. Spanke, F. U. Hillebrecht and E. Kisker: J. Electron Spectrosc. Rel. Phenom. 78, 237 (1996).
- 13) F. U. Hillebrecht, T. Kinoshita, D. Spanke, T. Dresselhouse, Ch. Roth, H. B. Rose and E. Kisker: Phys. Rev. Lett. 75, 2224 (1995).
- 14) D. Spanke, J. Dresselhouse, T. Kinoshita, Ch. Roth, H. B. Rose, F. U. Hillebrecht and E. Kisker: J. Electron Spectrosc. Rel. Phenom. 78, 299 (1996).
- 15) D. Spanke, J. Dresselhouse, F. U. Hillebrecht, E. Kisker, N. B. Brooks and J. B. Goedkoop: European Synchrotron Radiation, ESRF highlights, 1994/1995, 26 (1995).
- 16) K. Hiraki and K. Kanoda: Phys. Rev. B 54, 17276 (1996).
- 17) K. Hiraki and K. Kanoda: Phys. Rev. Lett. 80, 4737 (1998).
- 18) Y. Haruyama, K. G. Nath, S. Kimura, Y. Ufuktepe, T. Kinoshita, K. Hiraki and K. Kanoda: Solid State Commun. 110, 17 (1999).
- 19) T. Miyazaki and K. Terakura: Phys. Rev. B 54, 10452 (1996).