

## ◁海外情報▷

## A L S 滞 在 記

大阪大学基礎工学部 大門 寛

## はじめに

1994年8月から1995年5月末までの10カ月間、米国バークレイのFadley教授のもとに滞在し、第3世代の放射光施設 Advanced Light Source (ALS) を利用する機会に恵まれたので、現地の様子などを報告する。このリングはエネルギー1.5GeVで、エミッタンス3.6nmradの高輝度リングである。リングの諸元やビームラインの構成などについては、大垣氏の解説(本紙第8巻第4号(1995年)415頁)があるのでそちらを参照して頂くとして、ここではユーザーの立場から見たALSの様子などを記したい。

## バークレイの風土

滞在したローレンス・バークレー研究所(昨年から国立研究所となったので、略称がLBLからLBNLに変わった)は、サンフランシスコ湾の東側のバークレー市にある。LBNLは湾に向かう丘の中腹に有るので、サンフランシスコ、ゴールデンゲートブリッジ、ベイブリッジの全てが一望できる素晴らしく景色の良いところである。

この辺の気候は非常に特殊で、気温は海流で決められているため、一年中17度位でほとんど変わらない。特に奇異に感じたのは、周りの牧草で覆われている山肌である。夏は全て枯れていて茶色であるが、冬になると緑で覆われてくる。これは、夏が乾期で冬が雨期であることによるのであるが、北半球でも日本と逆の季節変化があるのを初めて知り、不思議な気がした。このあたりは暑過ぎず寒過ぎず頭を使う仕事には格好の土地であり、風光明媚でリラックスできる雰囲気のあるLBNL

からノーベル賞受賞者が9人も出たのもうなずける。日本にもこのような研究所が欲しいと思った。

## 生活環境の日米格差

通勤には自転車を利用したが、自転車道が高架鉄道(BART)の下に整備されていて、公園の中を走るような感じで街路樹や街並みを見ながら快適に走れる。日本では、狭い歩道を電柱や人に気を使いながら走るのに、快適に走れるところが無い。街並みも、電線や電柱が無く、本当に快適な住環境である。私は、子供の学校の関係で少し離れたところに住んだが、教授達は、LBNLの近くの丘の上の景色の良いところ(米国では山の上が高級住宅街である)に住んでおり、通勤時間は5分位である。離れたところに住んでいる人でも、Free Wayのおかげで通勤時間は30分以内である。渡米する前、30代の大半を片道2時間前後かけて官舎から大学に通っていたことを思うとうらやましい環境である。

高速道路が無料というのは、単に安く行けるというだけでなく、交通の効率を大きく高める。つまり、料金所がないので時間が節約されるだけでなく、出入口をたくさん作ることができる。1kmくらい先の店に行くにも家のそばの入口から入って店の近くの出口で出られる。ガソリン代も日本の4分の1であり、自動車交通の環境は雲泥の差である。日本でも、高速料金を無料にして、出入口をたくさん作ることによって便利にし、ガソリン税も安くして、郊外から自動車ですぐに通えるようにすれば住宅問題も大きく緩和するのではないだろうか。

全ての人が家族とアフター5を大事にしているのが日本との大きな違いである。夏時間の時には夜の9時すぎまで明るいので、色々な事ができる。無料のテニスコートは豊富にあって空いているし、劇を見に行っても千円もしない。日本では、仕事と家庭は一日のうちでは両立できないのが普通であるが、米国では通勤環境が良いために可能である。

確かにGNPはあまり変わらなくなってきたし、給与水準もあまり変わらないと言えるだろうが、食料や住宅等の生活必需品の価格が安いのと、社会資本が充実しているために、あちらの生活は豊かである。多くの施設が蓄積されており、それらが機能本位でなく人間本位に出来ている。例えば、数年前に出来た鳴門大橋は、鳴門の渦が見える絶好の場所に有るにも係わらず、歩道も展望台もなく、幅が広くて交通量が少ないにも係わらず停車して下を見てはいけないことに決められている。ゴールデンゲートブリッジは、歩道も付いていて展望台が両側にある。このような橋が戦前にできていたことは、パワーの差を認識させられる。日本でも夏時間が採用されるらしいが、物価が高く、生活のための社会資本が貧困で、家に帰るのに1時間半はかかる日本では、夏時間を採用しても果たしてどれくらい人生を豊かにできるかは疑問である。生活中心の社会資本を充実してもらいたいものである。

### LBNLでの研究環境の格差

LBNLは、カリフォルニア大学バークレー校の上隣にある研究所である。UCBとは密接な関係にあり、両方に籍を置いている先生もいて、学生の交流やセミナーの相互参加も活発である。両者とも世界的に著名な研究教育機関であるので、有名な人が多く訪れる。従って、居ながらにして世界のトップの講演が次々に聞けることは東洋の島国に居る我々にはうらやましい限りである。

滞在先の研究室はALSの隣の物質化学

(Material Science Division)の建物の1階にあった。そのフロアに小さいながら1部屋いただいて仕事をした。学生でも2人または1人で電話のある部屋をあてがわれていた。助教授でも個室が無いような日本の環境とは大違いである。

日本の大学との研究環境の大きな違いは、予算規模(これは文部省に頑張ってもらってとして別に)と、サポート態勢と安全管理だったように思う。機械工作とセラミック(ガラス)工作など、研究をサポートする人達との連携が密であり助言も多く得られ、新しいアイデアを実現するスピードが早くて確にできる。また、専任の秘書もいる。日本では定員削減でそのような方の定員が減っているが、研究環境の差をさらに広げる事になっており憂慮すべきである。

安全管理は徹底していて、電気の配線など自分ではできなかつたりして研究のブレーキになるような面もあるが、仕方ないところであろう。逆に、放射線管理は外国は一般に日本よりあまく、日本の窓の無い放射光施設ばかり見ていた私にとって、大きなガラス壁から外が見え、夕日が装置を照らしている光景は実に開放的であった。ビームラインの近くには飲食の出来るコーナーもあり、このようなリラックスできる環境は日本の施設にも欲しいところである。

カリフォルニアは、アジア系、アフリカ系、メキシコ系、ヨーロッパ系など多くの人種が集まっている所である。アメリカも理科系離れが進んでいることもあって、私のいた研究室の10人の学生のうち8人は中国などからきたアジア人であった。学生も妻帯者が多いこともあって6時頃には帰宅してしまうところは日本と異なっていた。しかし、土日にも出てきていたので、実働時間はあまり変わらないだろう。

### ALS

LBNLの中心的存在なのがALSである。ALSは、世界初の第3世代の放射光蓄積リングであり

1994年から400mAで運転が始まっている。日本では来年SPRING-8ができて初めて第3世代のリングを持つことになるので、ずいぶん遅れてしまっている。第3世代のリングは、周知の通り、輝度がこれまでのリングより2桁程高い。従って、これまでと同じような測定をしても時間が早く済む。しかしながら高輝度の利点は何と言っても光を簡単にミクロンサイズまで収束できることにある。この利点は顕微鏡的な使い方をするときにも最も強力になるため、X線顕微鏡やマイクロビームアナリシスのビームラインが半数以上を占めている。

### ビームライン

Fadley教授のビームライン9.3.2は偏向電磁石からの放射光をドラゴン型の分光器で単色化している。分解能は8000程度で、世界最高クラスである。3個の回折格子が水平移動で交換でき、使用できる光のエネルギー範囲は数十から1keV程度である。上下の成分を取ることで円偏光を使用できる。

分光器の出口には、半径2mほどの半円型のターンテーブルがあり、その上に2台の測定装置が乗っている。ターンテーブルを回転することにより、真空を破らずに交互に光を使用することができる。交換に要する時間は、回転だけなら5分位、調整も入れて30分程度である。このような大胆なアイデアもアメリカ的である。

### 円偏光光電子回折

今回の滞在研究の目的は、我々が高エネルギー研究所のAR-NE1Bで発見した「円偏光光電子回折」の現象を、高度ではあるが単純な系で実験し、理論的に確立する事であった。日本での実験では、光電子の前方散乱（最近接原子の方向に光電子が強く放出される現象）のピークが、円偏光の電場ベクトルの回転の向きに回転することを初めて観測したが、多重散乱の影響が大きく、理論的に単

純ではなかった。今回は、一回散乱が主になるようなW(110)面上に酸素Oが吸着した表面吸着系を用い、回転角を正確に測定することを目的とした。吸着酸素のすぐ下にあるW原子の内殻と、そのさらに下のWの内殻を分解能良く分離して測定する(Surface Core-Level Shiftと言う)ことにより、一回散乱が主になるような実験が可能である。

### 回転する分析槽

Fadley教授の分析槽には高分解能の電子エネルギー分析器(Scienta SES200)が付いている。この分析器は、最近日本にも数台導入されたが、円偏光が利用できるビームラインに設置されているのは世界でもここだけである。さらに、今回の実験に於いては、放射光を表面の法線方向から入射して、電子エネルギー分析器は特定の(前方散乱の)方向に置いて測定する必要がある。すると、電子エネルギー分析器を回転する必要がある。SES200のようなエネルギー分解能の高い分析器は大きさが1m位あり、通常は真空槽に付けるだけで精一杯であり、回転させることは思いもよらないことである。回転させようとするとき直径40cm位のベローズに何トンという力が不均一にかかり、正確に制御することはもとより、真空を維持するだけでも困難である。60度も回転させることができたのは、Fadley教授の強い意志と十分なサポート態勢であった。回転を実現しているのは世界でもここだけであり、今回の実験はここでしかできないものであった。

### 実験経過とトラブル

測定装置は、私が行ったときにはまだ隣の建物で整備中であった。He放電管を用いて希ガス試料の光電子分光を行い、数meVの分解能を得ていた。10月には装置をALSに運んで取り付けて予備実験を開始したが、分析器の回転の機構はまだ何も無く、固定されたままでデータを取り、ま

た解体した。次に回転機構を取り付けて組み立てたのが翌年2月、真空や回転のトラブルを解消するのに時間がかかり、円偏光度を測定する装置を取り付けたのが4月だった。その後、大垣氏の解説にあったリングのトラブルが発生して一月半シャットダウンし、データが取れるようになったのは帰国寸前の5月下旬であった。従って、円偏光を用いた実験は最後の週にやっと取ることができた。それまでは、ビームラインを立ち上げつつ、試料ホルダーを設計製作したり、実験室での装置を使った実験を行ってALSの実験に備えた。

高輝度リング特有のトラブルとして特筆すべきなのは、光の強度変動の問題である。20秒程度周期の数%の変動と、10分程度周期の20%程度の変動と、もっと長い周期の変動に悩まされた。高輝度であるから、10m位離れた分光器の入口スリットに30ミクロン程度に集光するのは簡単である。しかし、その強度を安定に保つには、ビーム位置の精密な安定性はもちろん、集光するミラー(チャンバー)の安定性が重要になってくる。10分程度周期の変動の原因は冷却水のon-offによる影響であるのは判ったが、ミラーの傾きが変わったのかどうかははっきりしなかった。また、ミラーチャンバーを置いてある床が、温度変化でマイクロラジアン程度変動しているのも一つの原因であった。とにかく、ミラーの傾きにフィードバックをかけて強度を安定させるのが現実的な対処法であった。今後の日本の施設においても、分光器の入口スリットの上下の電流を測れるようにしておき、集光鏡にフィードバックをかけられるようにしておくべきであろう。

図1にW(110)1×1-OからのW4fの光電子スペクトルを示す。スピン軌道分裂したバルクの2本組のピーク(4f<sub>5/2</sub>, 4f<sub>7/2</sub>)の他に、はっきり分かれた第1層酸化WからのW4fの2本組のピークが見える。このようなスペクトルを、実験室のXPS装置で、極角θ=0から81°まで3°おきに、方位角φは[001]方位から180°の範囲を

4°おきに測定し、カーブフィッティングを行い、これらのピークごとの2次元放出角度分布を作ったのが図2である。これらの図は、対称操作による平均を行い、補間したものである。

図2左は、バルクからの光電子回折パターンなので、菊池パターンのようにバルクの構造を反映したパターンが見える。図2右は第1層目のWからの光電子回折パターンなので、酸素原子を見る方向に前方散乱のピークが見える。これらのピーク位置から酸素原子の吸着位置が簡単な三角法で求められる。

この測定によって一回散乱のピーク位置が判ったので、これらが円偏光励起でどのように回転するかをALSで測定した。図1のようなスペクトルを、図2右の前方散乱の方向を含む領域(視射角16.5から29°)で測定し、フィッティングを行い、第1層からのみの光電子の放出角度分布を2次元的にプロットしたのが図3である。左回りの円偏光のときには左に、右回りの円偏光のときには右に回転しているのが判る。理論的にはこのピークの回転角Δφは次の式で求められる。

$$\Delta\phi = \frac{m}{kR\sin^2\theta}$$

ここで、mは光電子の角運動量の量子数、kは波数、Rは最近接原子までの距離、θは極角である。実験結果は予想通りの回転角になっており、単純な系でもこの式が成立することが判り、所期の目的を達成することができた。この研究は、このピ

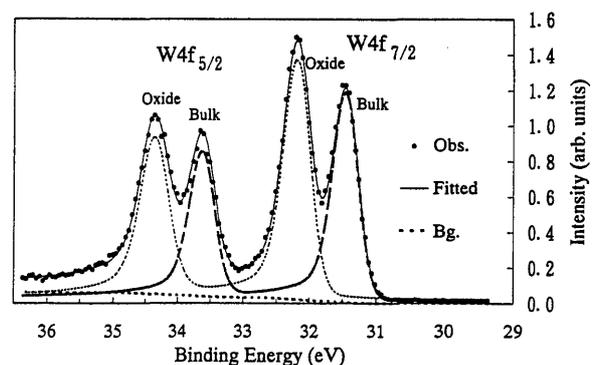


図1 W(110)1×1-OからのW4f光電子スペクトル

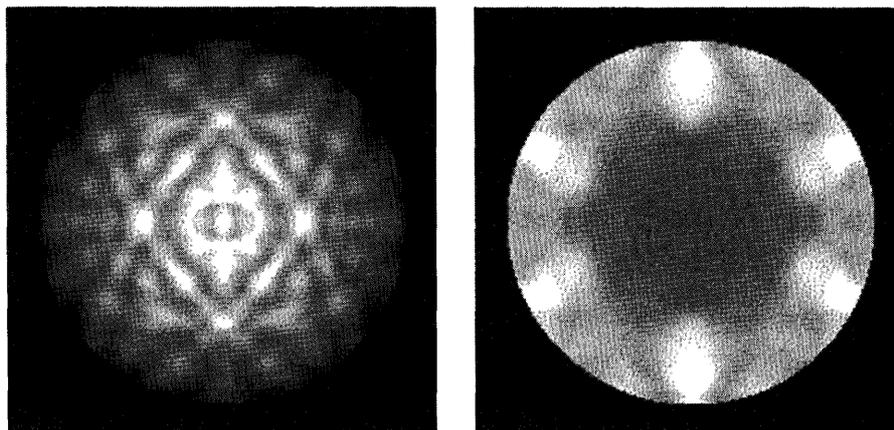


図2 W4fバルクピーク（左）と酸化物ピーク（右）の2次元放出角度分布パターン

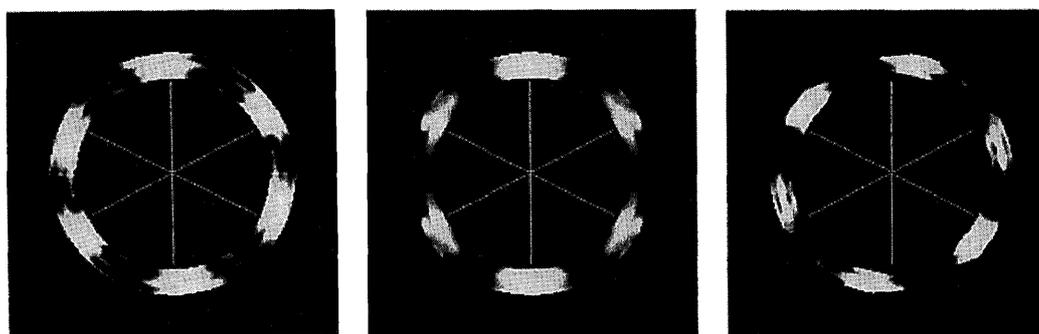


図3 第1層のW原子からの光電子の2次元放出角度分布パターン。励起光はそれぞれ（左）左回り円偏光，（中）直線偏光，（右）右回り円偏光。

ームラインとしては初めての本格的な成果であり、ビームラインの能力を最大限に発揮した結果としてALSニュースなどにも載り、先方にも喜んでもらえた。

### おわりに

振り返って彼我の状況を考えてみると、なかなか難しいものがある。日本の研究者と米国の研究者を比べても資質はあまり変わらないと思うが、日本の研究者は大きなハンディを持っていると思う。そもそも、物理学者なのに英語も勉強しなければならないので、言語体系の全く異なる我々は研究以外の所で相当な努力をしている。その上に、

上記のような研究環境、生活環境の違いが著しいので、互して競争していこうとすると、まだまだ我々は生活を犠牲にして努力する必要があるように思われた。

最後になりましたが、滞在費の一部を出して下さった山田財団に感謝いたします。また、留守の間に地震があったりして迷惑をおかけした菅先生を初め研究室の皆さんに感謝いたします。また滞在中は、Fadley 研の皆さん、LBNLの西村さん、小池さん、途中から来られた籠島さんをはじめ多くの現地の人に大変お世話になりました。