

# RIKEN ニュース

理化学研究所

## 小型軟X線レーザー

軟X線レーザーはX線ホログラフィーや、X線顕微鏡、リソグラフィ等多くの応用が考えられ、その実現が待たれているが、従来の方法を用いると装置があまりにも巨大になることが問題であった。我々は軟X線レーザーの励起レーザー波形ならびに励起方法に今までにない方法を用いることにより、従来の1/1000の入力エネルギーでも従来と同等のレーザー特性を出せることを示した。これは小型軟X線レーザー開発への大きなブレイクスルーになると思われる。

レーザーの発明以来30年余の年月が流れ、その間、レーザーの発展は目を見張るものがある。光通信やレーザーディスクを挙げるまでもなく、レーザー溶接、切断は小さな町工場にまで導入されるようになり、レーザーを用いた半導体プロセスは次世代半導体集積回路を製作する上で最も重要な候補の1つに挙げられている。またレーザーを用いた計測、ホログラフィー、あるいは医療応用等、その応用範囲は膨大になりつつある。レーザーの発展の歴史を振り返ると、基礎研究はもとよりこれらの応用は新しいレーザーが開発されるごとに飛躍的に発展してきたといっても過言でない。

レーザーが実現されている波長は種々のレーザー開発によって広範になってきたが、まだ実現さ

れていない、いわゆる未踏波長域がいくつかある。その中でも軟X線領域あるいはX線領域のレーザー(以下X線レーザー)はその実現の重要性と広い応用の可能性が長い間指摘されながら、その技術的困難さのために、その進歩は非常に限られたものだった。特に軟X線あるいはX線領域になるとフォトン1個当りのエネルギーが大きくなるため、それらの波長でレーザーを得るための励起レーザーは一般的に非常に高出力なものとなると考えられていた。米国等ではレーザー核融合に用いるための大出力レーザーの一部を用いてX線レーザーの開発研究が行われているが、用いられたレーザーは、それを入れるために大きな建物1つが必要なほど大きく、実用の面からいっても種々の問題があった。もし机の上のせられるほどの



小型X線レーザーが開発されれば、必要な場所にX線レーザーを設置して応用に賦されることができるようになり、レーザー応用の1つのブレークスルーになる可能性がある。

この度、理化学研究所では励起パルス波形ならびに励起方法を工夫することにより図1に示すように従来とは全く異なった領域にX線レーザーを得る高利得領域があることを見だし、軟X線レーザーの小型化に成功した（理研式軟X線レーザー）。これは従来1000分の1の励起強度で従来の方式で得られた利得と同等の利得を得ることができるものであり、小型軟X線レーザーの実現に大きな一歩をひらくものである。

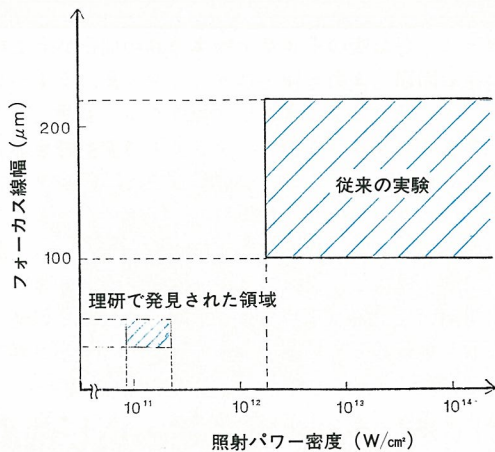


図1 理研で新たに発見した軟X線レーザーの高利得領域

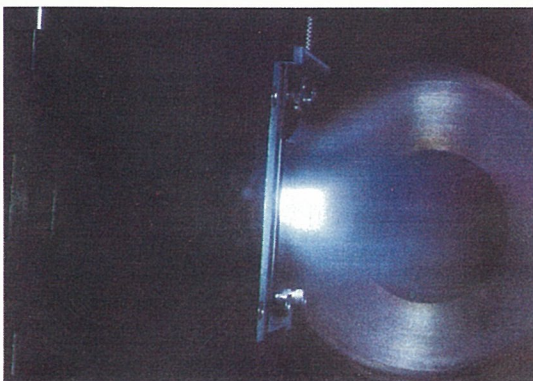


図2 レーザー生成プラズマ

本研究では軟X線を得る為に2 JのガラスレーザーをAlの金属ターゲット上に40ミクロンの線幅で線状に強く集束し、図2に示すようなレーザー生成プラズマを発生させる。図3に示す様にレーザー生成プラズマによりAl<sup>11+</sup>が生成されるがAl<sup>11+</sup>は電子との3体再結合により10個のAlのLi様イオンとなり、電子はAl<sup>10+</sup>の5f状態に貯められる。その下の3d状態の電子のAl<sup>10+</sup>の基底状態への緩和速度は十分速い為5fと3d準位間に占有密度の反転分布が形成されレーザー発振が期待される。

一般にレーザー生成プラズマはプラズマ生成場所がターゲット表面に局在しており、プラズマの拡散とともに強いプラズマの濃度勾配が生成される。従って、出てくるX線はその濃度勾配に伴う屈折率勾配のため強く曲げられ、利得媒質を直線で進む事ができず高いレーザー利得を得ることが困難であった。従来これを克服するために強いレーザーを幅広く(200ミクロン以上)ターゲットに照射し均一なプラズマを得て利得を得る試みが長い間なされてきた。この場合は必然的に断熱膨張

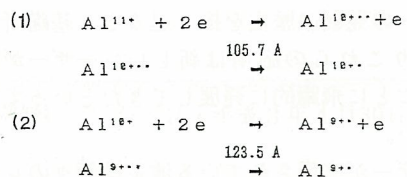
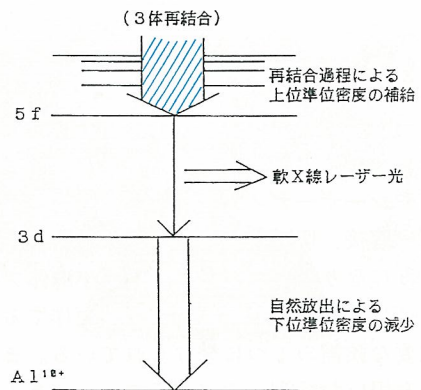


図3 再結合プラズマ法の概念図

比が高くとれないため大きな利得を得る為に強い励起を必要とし従って非常に高いエネルギーの励起レーザーが必要となる。我々はこれと全く違ったアプローチを試みた。即ち、レーザーをできるだけ狭くターゲットに集束しそこから出てくるプラズマの断熱膨張比をできるだけ大きくとり小さな励起パワーでも大きな利得を得られるようにまず試みた。この場合、励起レーザーのパワーは低く生成プラズマの濃度も低い為、たとえプラズマの濃度分布があったとしても光はそれほど曲げ

られず直進しプラズマはレーザー媒質としての条件を満たすことになる。第2番目に我々が試みたのは励起レーザーパルスの波形制御である。即ち励起レーザーをほぼ百ピコ秒のパルス幅を持つパルス列に整形しレーザー生成プラズマの電子温度が低エネルギー励起でも効率よく上がるように工夫した。

図4はこの様な2つの方法を合わせることでより得られたレーザーの利得を示す。即ち利得のない遷移では軟X線の発光強度はプラズマ長に対して線形に上がっているが105.7Åの光はスーパーリニアに強度が上がっており $3.4\text{cm}^{-1}$ の利得をもったレーザー作用を示している。この利得を得る為には従来、 $10^{13}-10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ の励起が必要であったが、我々はその約1000分の1の $8 \times 10^{10}\text{W}/\text{cm}^2$ で十分であった。これは従来、大きな建物が1つ必要であった励起レーザーが机の上ののるぐらい(図5)のレーザーで十分であることを示している。また従来観測されなかったAlのLi様イオンの4f-3d遷移に対応する154.7ÅならびにBe様イオンに対応する4f-3d、5f-3pに対応する波長177.8Å、123.5Åでもそれぞれ大きな利得を観測できた。同様の方法で我々はSiのLi様イオンを用いSiの12個の3d-5f遷移の88.84Åで利得を観測することに成功した。将来CaのLi様イオンを用いて同様の方法でレーザー発振が実現できると考えられ、これができれば、23-44Å近傍の、酸素の吸収はないが炭素の吸収はある、いわゆるwater windowと呼ばれる波長域のレーザーを得ることができ、水を含む生物体のX線顕微鏡やホログラフィーをとることができ、幅広い応用が期待される。

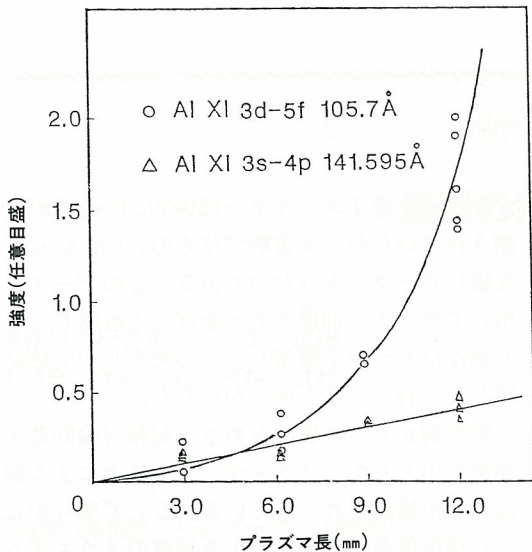


図4 軟X線強度とプラズマ長



図5 小型軟X線レーザー励起用  
ガラスレーザーシステム

我々の軟X線レーザーはまだ共振器がない、いわゆる誘導放出だけのレーザーであるが、コヒーレンシのよい、更に強い軟X線レーザーを最終的に実現する為には共振器ミラーを設置する必要がある。しかし軟X線領域の高反射率のよいミラーがないことが現在問題となっており、その早急の解決が望まれる。現在X線源としての応用を念頭においた高繰り返しのX線レーザーを得ることを目指して研究を進めているが、ミラー開発の課



題も解決するために努力を重ねている。

尚、この研究は原民夫研究員（レーザー科学研究グループ）、安藤剛三研究員（原子過程研究室）、その他多くの流動研究員、嘱託、委託研究生、ならびに研修生諸氏との共同研究によってなされたことを付記しておく。

半導体工学研究室(前レーザー科学研究グループ)  
主任研究員 青柳克信



## スポットニュース

### 鏡像電荷による電子加速現象の解明

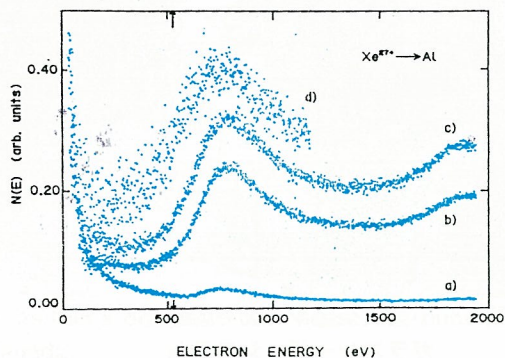
荷電粒子イオンが固体表面の近くにほとんど停止して存在する時、表面電子が粒子の方に引きつけられ、表面に電子密度の濃い部分が生ずる。これは鏡像電荷が誘起されたわけであり、このような分極現象は、活性炭による気体、液体の浄化等の応用例を見るように、物理吸着過程で重要な役割を担うものである。

しかしイオンが高速で表面近くを通過する場合は、単純な鏡像電荷の誘起ではなくイオンの後にわずかに遅れて、電子密度の濃淡（ウエイク）が現れる。これはちょうど舟の航跡に似ている。最近このウエイクにより、電子が加速を受けることが実験的に見い出され注目されている。

金属物理研究室の小山研究員らは、重イオンを用いれば大きなウエイクが誘起され電子加速効果が明確に観測できると予測し理研の重イオン線型加速器を用いて、 $N^{6+}$ 、 $Ar^{12+}$ 、 $Xe^{27+}$ 等の高速イオン（核子当たり1 MeV）をAl表面に対して $1^{\circ}$ という角度ですれすれに入射させ、放出された電子のエネルギー分布を測定した。図は $Xe^{27+}$ イオンを入射させた時、表面に対し(a)  $3^{\circ}$ 、(b)  $6^{\circ}$ 、(c)  $8^{\circ}$ 、(d)  $15^{\circ}$ 方向に放出された電子のエネルギースペクトルである。従来 $H^{+}$ イオンを用いた実験では、イオンと同じスピー

ドをもった電子エネルギー530eVにピークが観測されていたが、本実験ではその1.5倍も大きな値にピークが現れたのである。このデータを用いてウエイク加速モデルを詳しく吟味してより進んだモデルを構築し、このモデルが実験結果とよく合うことを明らかにした。

数年前から、次世代をめざす超相対論的電子加速器用として、プラズマ・ウエイクによる加速方式が検討されてきている。ここで明らかにした鏡像電荷ウエイクによる加速のメカニズムは、ウエイクの生成方式の違いを除いて原理的にはまったく同じ現象が微視的な世界でおこることを示したものであり、多方面への寄与が期待される。



## 理研シンポジウム (5月)

## テ ー マ

自律分散型ロボットシステム  
 化学反応とレーザー分光  
 -カルボニル化合物の光化学反応-

## 担当研究室

化 学 工 学  
 理 論 有 機 化 学

## 開催日

5 / 14  
 5 / 24

## 理研の主な公開特許

## PH02-224322 電子像投射形成装置

情報科学研究室 出澤 正徳  
 半導体工学研究室 河村 良行

〔概要〕光電面へ、予め光学的にパターン化された光を投射し、そのパターンに応答した面状電子源を形成し、発生された電子を加速し、投射面に面状電子像を形成することにより、電子的速度で種々の形状、サイズの要素電子像の生成を可能とする。

## PH02-243584 レーザーによる固体高純度化法

分離工学研究室 武内 一夫

〔概要〕固体にレーザー光を部分的に照射してこの部分を加熱溶融し、次いでレーザー光の照射部分を一方向に移動して加熱溶融部分を移動させることにより、固体の高純度化を容易に達成する。

## PH02-229425 II-V族化合物半導体ドーピング法

フロンティア研究システム 飯村 靖文  
 他4名

〔概要〕ドーバント原子を含むドーバントガスであるIII族有機金属化合物ガスに当てる電子線のエネルギー及び密度、即ちフィラメント電流やグリット電流を変化させて原料ガスを操作することにより、結晶中の不純物を高精度に、また簡単に制御する。

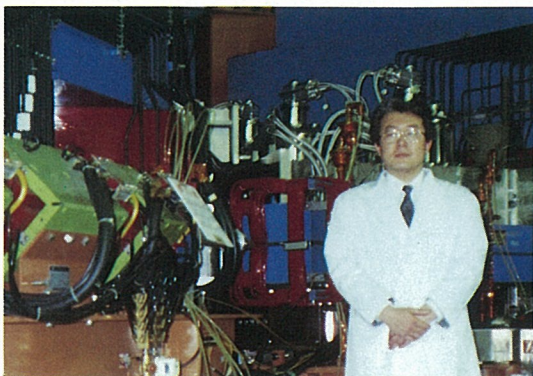
## PH02-255537 二酸化モリブデン微粒子製造方法

レーザー科学研究グループ 大山 俊之  
 分離工学研究室 武内 一夫

〔概要〕 $\text{Mo}(\text{CO})_6$ と $\text{CS}_2$ または $\text{H}_2\text{S}$ を含む混合ガスにレーザー光を照射することにより、粒径が非常に小さくしかも均一で、また固体潤滑剤として利用できる $\text{MoS}_2$ を得る。



## 新主任研究員(部長)紹介



サイクロトロン研究室 矢野 安重

私は道具屋です。理研に入所してから11年間、リングサイクロトロン、入射用サイクロトロン、ECRイオン源、原子核用大型実験装置と“もの作り”一途にきました。これらの装置は大掛かりなものばかりですが、設計の細部まで私達自身の手が入った言わば手作り品で、様々なアイデアが盛り込まれて世界に無二の装置になっています。完成までに長い年月を要したことから最初のビーム加速に成功したときは、まさに欣喜雀躍しました。このときの感動と重イオン加速の世界最高性能を達成したときの快哉は、本誌(No.106)「天の美祿に酔いしれた日」で紹介しました。

この重イオン加速器は、運転を開始して以来極めて短期間のうちに、原子核から医生物にわたる広範囲の基礎研究分野で数多くの目覚ましい成果を挙げてきました。—世界最強のRIビームの達成、世界初の偏極RIビームの実現、3種類の新同位元素の発見、宇宙開闢直後の元素合成の謎解き……そして超重元素創成への挑戦、これらはまるで現代の錬金術と言えます。—なるほど道具だな。それにしても腕のいい職人(研究者)にめぐり会えたものだなあと、悦に入っています。

理研は、仁科博士が日本で最初のサイクロトロンを作って以来50年有余の綿々たるサイクロトロンの歴史を築いてきましたが、私達は、いま再び、このリングサイクロトロンを携えて重イオン科学の豊穡の世界へ向けて動き始めたなど、感じています。



触媒研究室 川合 真紀

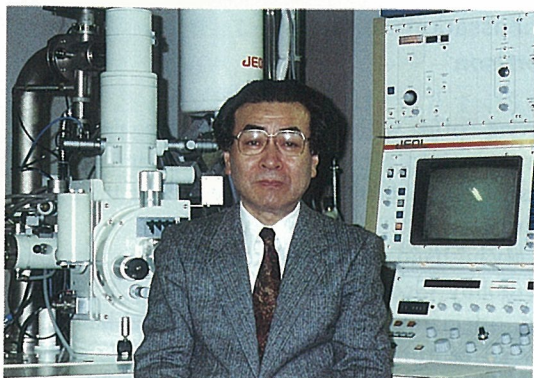
1980年4月、初めて理研の門をくぐって以来、理研とは10年来のお付き合いになります。特別研究生として、現在の無機化学物理研究室の前身に当たる固体化学研究室に2年間在籍したのが始まりです。狭苦しい大学の研究室しか知らなかった若年者には、広々とした研究所という感想を持ったものです。このとき触媒研究室の方々と共同研究したのが縁で、1985年4月に正式に理研の所員として採用され、現在に至っております。

ここ3年ほどは、東京工業大学に新設された寄付研究部門へ出向させていただき、これまでの専門分野であった、固体表面での化学反応の研究と並行して、酸化物超伝導薄膜形成に関する研究を行ってきました。固体表面に特有の様々な化学的な性質を利用することにより、表面上に特異な構造を有する物質を形成していくことができます。まさに人工物質合成ともいえるこの方法は、これからの表面化学の重要な一分野といえます。

触媒研究室では、今後、固体表面で起こる様々な化学現象を研究してまいります。研究を展開する上で、いろいろな方々との共同研究のできるオープンな研究室にして行きたいと思っております。

(写真は、夏のヘルシンキ、11PM)





## 研究基盤技術部

坂入 英雄

研究基盤技術部が発足後4年目に入りました。この間表面解析室長を勤めさせて頂きましたが、この度部長職に就くことになりました。長い部名で所員から基盤技術部、技術部、あるいは“キバン”と呼ばれながら、新しい部として馴染まれつつあるようです。この日本語名からは部の内容がはっきりしないと、特に外部の方からよく言われますが、英語名は、Instrumentation and Characterization Centerとなっていて機器開発と分析評価を主内容とする組織という実態が明瞭です。

さて自己紹介ですが、私は物理科の出身で結晶の格子欠陥が最初の研究対象でした。理研では、金属物理研、ビーム解析室、表面解析室と移りながら、サイクロトロンやタンデトロンといった加速器を使って固体の放射線損傷を調べたり、イオン散乱分光の手法で固体の構造解析、状態解析を行ったりしてきました。表面解析室ではともあれ分析機器の充実につとめましたが、量的拡大が先行してサービス面を充足させるところまで至らなかったのが心残りです。

こういうせまい分野で仕事をしてきた人間が、これからは学生時代に苦手だった有機化学は勿論、生物学の分野の方達ともおつき合せねばなりません。大変だと思ふ反面、楽しみな気分もあります。最後に、趣味は基とボーリング、それに（一応は）テニスということにして置きましょう。

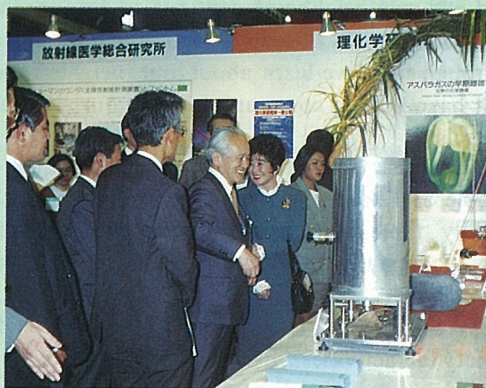
## 「サイエンスNOW'91」の開催

“豊かな未来へのさきがけ”

桜も満開の去る4月10日(水)～13日(土)、晴海・東京国際見本市会場において、「サイエンスNOW'91」(科学技術庁関係の16機関が研究成果等を展示)が「Technology Japan'91」の一端として開催された。

理研では、最新の研究成果8点\*をパネルや実物などで分かり易く紹介し、新しい科学技術の動向を探る大勢の見学者の注目を集めた。

会場は汗ばむほどの熱気につつまれ、11日(木)には山東科学技術庁長官が御視察、小田理事長の軽妙な説明に、にこやかに微笑まれながら、熱心に耳をかたむけられた。



### 【展示パネル、展示物】

- \* 超高压有機合成の開拓
- \* アスパラガスの早期雌雄判別
- \* 世界の野生稲種子
- \* 高出力波長可変固体レーザー
- \* 酸化物超伝導体磁気シールド装置
- \* 両眼立体視による3次元錯視表面の知覚
- \* 初期宇宙での元素創成
- \* 素粒子ミュオンの科学





## A Canadian Mother : "Ambassador" to Japan by Debbie Morrison

Of the many foreign researchers that come to work at Riken, most come alone and some come with a spouse. We came to Japan as a family of four for a scheduled stay of a year and a half. As the wife of an STA Fellow at Riken, and the mother of two young children, I'm also a sort of 'ambassador' to the people that I meet here in Japan during our stay.

In a sense, supporting my family and maintaining our family life has not changed. There is still the running of a household to be seen to. This is made more difficult by different products, foods, and being handicapped by a different language. From being active and independent adults in our own society, we have become illiterate and dependent on the help of others. This dependence has decreased over time but always remains. Riken staff, and our new neighbours continue to be, our fundamental sources of help, support, and friendship. Through them we learn about our neighborhood, and have help to communicate with our children's schools.

As 'ambassador' I meet friends, neighbours, or people at Riken. In a world that is changing so rapidly, the extension of friendship, and acquiring new understanding of other people is extremely important.

To that extent, I try to meet people through a variety of activities. Even something as simple as

having coffee with one of my Japanese neighbours can turn into a culture, geography, and language lessons, and lets me see into the lives of the people I live near.

My husband and I also like to pursue our favourite hobby, Scottish Country Dancing. This dancing, originating from Scotland's formal ballrooms several centuries ago, is now a worldwide activity – including several groups here in Japan. We enjoy it for the challenge and the exercise, the social contacts, and the chances of personal growth. Our regret is that we are unable to attend functions and regular dance activities here in Japan very often. Commitments to work, our interest in touring Japan as much as possible, and our regular life, means that it is not always possible to attend the dance functions. Also, the difficulty in finding babysitters for our children has restricted our dancing to special occasions. When we do make it out, however, we find the group to be enthusiastic, warm and welcoming. On a recent weekend, we combined sight-seeing with dancing by going to a special dance function in Sendai.

We will return to Canada in August, after adding our third child to the family, and we'll have many warm and treasured memories of our stay here.



Mothers from Suwahara-danchi in costume to present a scottish dance at Sumire Yochien.



A mother's domain : our house in Suburban Canada.



## US TOGETHER

カナダより科学技術庁招へい外国人研究者として、レーザー化学の研究を行っている夫と来日。長女は理研の近くの幼稚園、4月からは小学校に通っている。

## 民間大使としてのカナダの母

(要約)

私は、夫の研究のための支えになろうと行動し、家庭の主婦と母親としてもできる限り通常の家生活を維持しようとし、また一方では一種の民間大使でもあると考えています。

私の民間大使としての役割は、毎日私が会う友人、隣人、理研で新しく知合いになる人との接触の中で果たされてきました。ときとして、微笑みをたたえ、他人のことに興味をもつのは大変なことと思えますが、その成果は大きなもので、十分努力するに足るものです。

日本人の方とお茶を飲むといったささいなことでも、文化、地理、言葉のレッスンになり、更に私の近くに住む人の生活を見聞させてくれます。理研には、多くの外国人研究者がいたおかげで、他の文化に接触する機会も多く与えられました。友好を目的とした活動を通じた国際的の会合には参加するように心がけ、手助けと支援、理解をするように努めました。

夫と私の趣味はスコットランド舞踊です。これは、

何世紀か前のスコットランドの正式な舞踏に源を発するダンスの社交界的な形のもので、これは現在では世界的な活動になっており、日本にもいくつかの愛好家グループがあります。それを通じてダンスを楽しむとともに、彼らのグループの運営を助けることで社会的な接触をもち人間の成長の機会を得ることが出来ます。日本で、ダンス行事や定例のダンス会に参加できなかったことが残念でした。これは、研究上の理由や子供の幼稚園での行事の参加、できるだけ多く日本の国内を旅行しようとしたためでした。また、子供がベビーシッターになかなかなじまないということもありました。こういった点を除けば、我々は熱心で暖かく大歓迎してくれたグループによく出会いました。先日の週末に、仙台で特別のダンス行事に行き日本のもう一つの面を見ることができました。

私達は、3人目の子供が生まれた後、暖かく、そして宝のような日本の思い出とともに8月にカナダに戻ります。

## スポットニュース

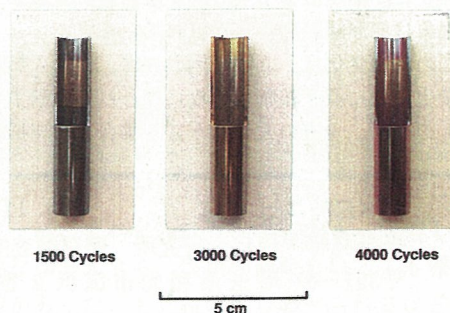
## 室温でアルミナ薄膜のデジタル形成

有機アルミのガスを用いて、室温で金属、半導体、ガラスなどの表面に原子単位でアルミナ(酸化アルミニウム)薄膜を均質にデジタル形成できる画期的な新技術を開発した。

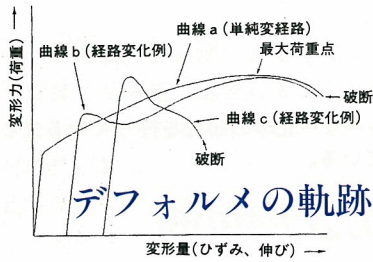
この新技術では、真空容器に試料を入れ、トリメチルアルミのガスを導入直ちに排気して、次に過酸化水素ガスを供給してアルミナ薄膜を形成する。このトリメチルアルミの導入・排気～過酸化水素の導入・排気の1サイクル(約10秒)で膜厚約2Åのアルミナ薄膜をデジタルに形成することができる。

この方法は、ステンレスパイプ内・外面へのアルミナ薄膜の形成が容易にでき、耐食性を約200倍に向上させることができる(写真)。このほ

か新技術は、ガリウムヒ素半導体の絶縁膜や保護膜の形成、半導体製造に用いる耐酸性ハンドリング器具の被覆、窓ガラスやミラーのコーティングなど、極めて広範囲な分野で大きな波及効果が期待される。(レーザー科学研究グループ)







変形、この世の中で形の変らないものはありません。にも拘らず、変形に関する学問と言えるような研究が始まったのは比較的新しく、まだまだ分からないことが多いのです。形が変わる原因は物理的、化学的、生物学的といろいろありますが、私に理研での30年余りを楽しく過ごさせてくれたのは、物体に力を加えて生じさせる変形、それも形が元に戻らない永久変形（塑性変形）でした。写真は20年以上前のユングフラウと私です。地球の表面が収縮する力のできたのがユングフラウのような褶曲山脈ですが、今もその姿はほとんど変わらないように見えます。それに引き換え、原因は違いますが、私はかなり変形してしまいました。

金属を塑性変形させますと、硬くなって行きます。図に示すように、変形量（ひずみ）の増加とともに、変形させるために必要な力が増加しますが、これをひずみ硬化（または加工硬化）と呼びます。材料が硬く強いことが要求される製品を得るために、この加工硬化はよく利用されます。加工とそれによる硬化との関係は、後で触れますが、教育とその結果としての教養・知識などとの関係と似ているところがあります。引張試験を例に取りますと、材料が伸びるとともに引張る力が最大（最大荷重点）となった後、一部だけが細くなって切れてしまいます（曲線a）。材料が切れるまでどれだけ伸びるかという能力は塑性変形を利用する加工方法（塑性加工）の可能性を支配する大切な性質です。自動車のボデーのような複雑な形状の成形加工では、材料は単純に一方にだけ伸ばされるのではなく、加工途中で伸びたり縮んだりする方向が変わるのが普通です。この現象は変形経路変化と呼ばれています。

この経路変化は、人間で例えれば、文化人類学専攻の学生に急に原子核物理専攻に変われと強制するようなものです。大抵の人がこう言う場合は大変抵抗する

ものです。金属材料も似ています。引張る方向を変えると、今までよりも大きな力が加わらなければ、変形は嫌だと駄々をこねます（曲線b、c）。しかし、変形がまた始まると加工軟化と言ってへなへなと弱くなる挫折のような現象が通常生じます。最初の変形が小さい場合（曲線b）は経路変化後にいったん加工軟化しても、また加工硬化（人間で言えば、成長？）が始まります。しかし、曲線cのように最初の変形がかなり進んだ後は、経路変更に大きく抵抗し、無理矢理変形させると、すぐに破断してしまいます。加工硬化がある程度進むと、環境の変化に対応できなくなることを示しています。人間でも若いうちの進路変更なら、やり直しが利きますが、年を取ってからでは難しいようです。狭い範囲に集中して知識が増えるだけでは、頭が固くなり、専門馬鹿となり易くなる傾向と似ています。理研のような研究所で働く私たちは、限られた世界の中で、自分の好きなことだけに没頭出来ることを幸せとは思いますが、何かにつけてドグマに陥り易い危険を忘れてはいけなように思います。広い世界にいつも目を向けることは老後のぼけ防止にも役立つでしょう。いつまでも「ヤワラカアタマ」していきたいものです。



素形材工学研究室  
副主任研究員 宮内邦雄