



Kanace

分子科学研究所 技術課活動報告

No.5

「技官、教官、事務官は研究を支える三本足の鼎である。」



鼎（かなえ）

中国古銅器のうち食物を煮る三足の器。先史時代の土器を祖型とする。殷周時代には、祭器として尊ばれ、権威の象徴でもあって、奇怪な動物文や銘文をつけたものが多い。戦国時代には、貴族の日用の器となり、華美な装飾が施されたが、漢時代には無文となり、六朝時代には衰えた。隋唐以後は、本来の用途から離れ、香炉の形として面影をとどめるだけとなった。

(小学館「大日本百科事典、ジャボニカ」)

目 次

巻頭言

技術研修制度についての分子研の役割 分子科学研究所長 伊 藤 光 男 1

特別寄稿

岡崎と研究についての思い込み 岡崎国立共同研究機構管理局総務部長 柴 崎 明 博 2

新技術課長誕生

愛される技術課から信頼される技術課へ—そして世界の技術課へ 技術課長 酒 井 楠 雄 3
オーケストラとアンサンブル 基礎生物学研究所技術課長 服 部 宏 之 4

トピックス

内田前技術課長送別

退職に寄せて 第一技術班長 松 戸 修 6

シリーズ特集「S+」

シリコン表面の酸化反応 基礎電子化学研究部門 松 本 吉 泰 8

技術活動報告

He原子のレーザー冷却 分子構造研究系技術係 熊 倉 光 孝 12
UVSORビームラインBL3Bにおける2次元光電子分光 極端紫外光科学的研究技術系 服 部 秀 男 18
有機(超)伝導体の核磁気共鳴 分子集団研究系技術係 宮 川 和 也 22

技術講座「知らなきや損する技術の常識」

機械工作を10倍楽しくする方法 (最終回) 装置開発技術係長 堀 米 利 夫 25

マイレビュー

光合成の初期過程の研究について 電子構造研究系技術係 熊 崎 茂 一 31
My Interactions with Science and Social Activities in IMS and Okazaki Department of Electronic Structure Dr. Haridas Pal.... 34

科学講座「知って得する分子科学の常識」

レーザーの話 (第4回) 装置開発室 浅 香 修 治 36

“声”「本音を言わせて、聞かせて」

実験装置の作成環境のカスタマイズ 名古屋工業大学 森 義 仁 38
「あれこれ」 名古屋大学理学部装置開発室 鈴 井 光 一 39
慣れ親しんだ職場から新たなる職場 装置開発技術係 鳥 居 龍 晴 41

巻頭言

技術研修についての分子研の役割

分子科学研究所長 伊藤光男

大学、研究所にとって、研究施設、設備を支え、さらに新技術を開発していただく、技官の方々の存在は非常に大きく、研究の質はこれら技官の技術レベルによって決まる、と言っても過言ではない。最近の技術進歩は目ざましく、技官の方々が最新の技術を修得し、新しい研究の展開に貢献することが、強く求められている。にもかかわらず、大学、研究所における技官をめぐる情勢は極めて憂慮すべき状況にある。度重なる定員削減により、技官の絶対数が著しく減少しているにもかかわらず、一方では増えつづける研究設備が、技術要求に対応する日常的業務に忙殺され、その結果、技官として最も必要な新技術の修得や、技術向上がほとんど行われない状態になっている。また、一般的に技官の流動性は悪く、技術交流の機会が極めて少ないことが、事態をますます深刻化しており、技官の勤労意欲の低下につながっている。このような閉塞的な情況に對して、有効な手が打たれないまま推移している。

一方、分子研のような大学、共同利用研の場合、全国の研究者との交流が、共同研究等を通じて日常的に行われており、双方の研究者の活性化に大いに役立っている。同じような事がお互いの技官の間でも行なうことができれば、技官の活性化につながるかも知れない。また、分子研のような所が、そのような役目を果たすこと、大学共同利用機関としての、義務の一つでないかとも考えられる。

たまたま、昨年、某国立大学の教授から、自分の研究室の技官を、技術修得のため、一定期間分子研の施設に派遣したいが受け入れてもらえないだろうかという相談を受け

た。至極当然な要望で、別に問題はないと簡単に考えていたのだが、よく調べてみると技官の研修受け入れについては、正式な制度や予算もなく、研究者受け入れの場合と、全く事情が異なることが分かった。研究と技術は、表裏一体にあると考えると、これはおかしな事であると言わざるを得ない。そこで装置開発室長である北川禎三教授に、受け入れについて具体的な検討をいただき、一方では、管理局のご理解と予算面でのご配慮をいたいたいた結果、大学に所属する技官を、一定期間、分子研の研究施設に研修の目的で受け入れるための、技術研修制度を発足させた。この制度によって、平成7年度に他大学から、7名の技官の方々を受け入れた。派遣側、受け入れ側双方にとって、非常に好評であり、平成8年度も続けて実施する予定であり、将来的には正式に制度化して、定着をはかりたいと考えている。

現在のところ、受け入れ体制、予算等の種々の制約があり、一つの小さな試みに過ぎないが、これが皆さんのご協力で、より力強い歩みとなり、新しい技術の習得、向上に資するとともに、将来的には、技官の人事交流につながるよう願っている。もしこのようなことが全国の大学、共同利用研で行なうことができれば、各研究所での規模は小さくても、全国的な流れとなって、全国の技官の活性化と、研究技術の飛躍的向上につながるものと信じている。分子研がこのような大きな流れをつくるよう、お互いに努力しようではありませんか。



「正面から見た分子科学研究所」

特別寄稿

岡崎と研究についての思い込み

管理局総務部長 柴崎明博

昨年4月に文部省から本機構に赴任して、最初に受けた印象は、愛知教育大学の跡地であるとはいえ、よくもこう恵まれた立地条件の下に建てられたものだという感慨であった。特に、岡崎城の方から見ると小高い丘の一等地に見える。また、赤レンガ造りの建物群と木立とが調和し、素晴らしい環境を醸し出しているのである。

20年前に酒井技術課長と一緒に勤務したことのある高エネルギー物理学研究所が、平地にコンクリートの白い建物群の偉容を誇っているのとは、同じ大学共同利用機関といつても、全く異なる雰囲気を持っているのである。

岡崎の地は、歴史と伝統の街である。徳川家康や勇猛果敢なる三河武士の地である。また、本多光太郎先生を始め多くの優れた学者を輩出している地でもある。本多先生が岡崎の出身であることは、はずかしながら、東北大学に出張のおりに金属材料研究所長の鈴木謙爾先生に教えられた。その後、市内の東公園に本多光太郎博士資料館があることがわかった。

岡崎の気風は、勝手に決めさせてもらえば、「剛毅」、「力を力として認める気風」だと思う。剛毅な気風は、朝夕の通勤時の容赦のない交通マナーで実感としても感じさせてもらっている。

私の郷里の福島県いわき市も、かつては磐城平藩であり幕末最後まで徳川方につき、会津藩などとともに敗れ去つたのであるが、同じような気風がある。

このような気風を有する岡崎の地は、考えようによっては、学術の世界が真理の探究で容赦のない世界であることからすれば、最も条件がよい土地柄なのかもしれない。

なにより、機構をやめられてからも岡崎市内に居を構えられたり、在職中に岡崎市内に持家を求められるケースが多いことからも伺われる。

さて、世に不況感が長引き、産業の空洞化や若者の理科離れ、大学生の就職困難がいわれ、さらにいまわしいオウム事件が起きたりすると、社会はなにかこれまでとは異なる大きな力、新しい活力源、起爆剤を待望するようになる。

まして、アジア各国がその安い労働力等を武器に産業の目覚ましい発展を見せはじめ、日本の産業、経済の影響力が世界の中で相対的に衰えてくると、日本が技術や工場の移転を早めすぎたのではないかとさえ思えてしまうのである。また、日本キャッチアップが迫っているとの脅迫観念も出てくる。

しかし今さらひがみやうらみは持ちたくないものである。なにより幕末から明治以降に、我が国も欧米に学び、欧米

も、当時、後発であった我が国によく教えてくれたと思うからである。また、アジア各国も、ルックイースト政策を掲げてマレーシアの経済を発展させているマハテール首相にみられるように懸命に先進各国に追い付こうとしている。

これからの時代は、これまでにも比して、社会や国の活力の浮沈は、より学術研究の成果によるところが大きいと思う。これまでのような先進国、発展途上国との間にあったいわば立ち上がり、スタートのハンデキャップの影響はなくなり、それこそ、産業の起爆剤となる学術研究の成果で決まると思う。

学術研究が、優れた成果を生み出すか否かは、国の人ロや国土の広さより、創造性豊かな発想がどう引き出されるかであると思う。

素晴らしい果実は、好条件の土壤に育つと考えるのが自然であると思う。

厳しい研究環境の方がよいのだとする意見もなくはないが、やはり、人的な面を含む恵まれた研究環境の方が、油断がなければ、素晴らしい果実も生みやすいと考えたい。

最近は、国の学術振興への予算的な措置にも力が入ってきて、研究費や施設設備もかなり充実してきているが、これらとともに欠かせないのが、人材であり、人的な体制である。

本誌がタイトルを「鼎」とし、その意が「技官、教官、事務官は研究を支える三本足の鼎である。」とあるとしたのは素晴らしいと思う。

分子科学研究所、及び本機構が、今後とも研究の発展のため、また、一層高まるCOEとしての期待に応えるために、この研究所、機構に働く我々は、まさに「鼎」となり、3本足の1本を担う、さらなる自覚と実行を求められている。

その際、環境や安全など、人間社会に真に役立つものは、との観点から、絶えず謙虚に配慮してゆくことはもちろんである。

東公園にある本多光太郎博士資料館のビデオによると、あの本多光太郎先生も、有名な磁石鋼を発明された時は、熱をだして寝込んでおり、弟子が溶鉱炉の前で実験し、検証した結果を報告に馳せ参じているのである。

管理局も鼎の1本の足として、がんばらせていただくなつりである。

新しい年を迎えて、研究所として、機構として、実も形も、断じて、鼎の軽重が問われることのないように一丸となって歩まなければならないと思う。

新技術課長誕生

愛される技術課から信頼される技術課へ—そして世界の技術課へ

技術課長 酒井 楠雄

「走り幅とびで勝ちたければ、10メートル跳べる選手を1人見つければよろしいので、
1メートル跳べる選手を10人そろえても無駄である。」

(ジョン・マーシャル スタンフォード大学陸上競技のコーチ)

技術とは、「科学の理論を実現するためのわざ」と言う意味があります。これをもっと深く考えると、「人間の夢を実現させるためのわざ」とも言えるのではないでしょうか。空を飛びたい、海の底へ行きたい、健康で長生きしたい……。より便利に、より豊かに、より楽しく、そしてより幸せに、人間の夢(欲望)は限りなく、何時までたっても満たされることはないでしょう。それを実現するために、いろいろな科学が、技術が必要となるのだと思います。

分子科学研究所に於いても、研究者と技術者の、守備する範囲は違っていても、人間の夢を実現するために、分子科学の分野で貢献するという目的は同じだと思います。我々技官の守備範囲も、施設、部門、によって異なります。しかし、かつての巨人サード長島茂雄はショート(当時広岡達郎)ゴロを2度捕ったことがあるそうです。ですから、当然我々としては、自分の守備範囲をしっかり認識し、最善を尽くさなければなりませんが、研究所の目的という観点にたった場合、自分の守備範囲しか関知しないというのはどんなものでしょうか。技術課は、1人で10メートル跳べなくとも、みんなが力を合わせて、11メートル跳ぶことが出来る課でありたいと思います。

さて、技術課の技という字は、手足を使ってほどこす細工と言う意味があり、術という字は、師弟のあいだで伝承される、伝統的なわざという意味があります。私は、この術という字の持つ意味を、技術課に活かしたいと思います。しかし、これは昔の封建的徒弟制度を復活させるという意味ではありません。我々は分子科学に必要な技術を確立し、お互いにそのわざを磨いていかなければなりません。そしてそれを後輩に伝えていかなければなりません。ここで私は、師から弟子へ、先輩から後輩へ伝えるわざとは、単に手先だけのわざではなく、人間としての生き方をも含まれていると考えます。昔、剣の達人といわれた人は、死の床につくまで、一日たりとも修行を怠らなかつたそうです。相撲は強いだけでは横綱になれません。技術課の組織の中で、上司は、そして先輩は、後輩を単に技術者として導くのではなく、己を含めて、人間として完成しなければならないことを忘れてはならないと思います。

かく言う私も、技術者として、人間として、まだまだ未熟者です。どうか技術課のみなさん、その道の達人をめざして、そして世界の技術課をめざしてお互い精進いたしましょう。

金を払えば、他人がしてくれることまで、自分の手を煩わすには、

人生は余りに短いと私は昔から思っていたが、

自分にしかできないことだけを自分でするという贅沢が出来る程、私は金持ちであった。

(サマアセット・モーム)

丸くとも 一角あれや 人心

あまり丸きは 転びやすきぞ

(坂本龍馬)

昨年9月に前内田課長が定年退職され、10月より第4技術班長の酒井楠雄氏が新技術課長に就任されました。
ここに掲載した原稿は、酒井氏が就任された際に技術課員一人一人に手渡されたメッセージの写しです。

オーケストラとアンサンブル

基礎生物学研究所技術課長 服部 宏之

私の趣味の中には、渓流釣りと音楽鑑賞がある。なんでも手を出すたちなので、とりわけドップリと浸るほどではない。しかし、岡崎に生活するようになって17年近くになろうとしているが、つい2年前まで、岡崎「第九」を歌う会という、ベートーベンの交響曲第九番のコーラス部分を歌う、地域のアマチュアサークルで10年近く歌ってきた。決して歌がうまいわけでもなく、勿論いい声ができるわけでもない。ただ、当時は岡崎に来たばかりで、ともかく研究所のそとの人と付き合ったのがその動機の一つでもあった。たまたま学生時代に合唱をした経験があり、「ベートーベンの第九」を一度歌ってみたかったという願望を前から持っていたので参加する事にした。これは結構楽しかったが、毎週金曜日夕方7時から9時まで、6月から12月の半年間、仕事を終えてからの参加はスケジュール的に結構厳しいものがあった。遅刻は常習であったが、一年目をクリアすると、二年目からは仕事のリズムもでき上がり何とか時間的なやりくりが出来るようになる。何よりも、1年中ではなく後半の半年間だけというのも魅力で、その上、週一度大声を張り上げるあの爽快感は、気分転換には最高で、他に比べようがない。カラオケのあの自己陶酔的な独特の雰囲気よりもはるかに開放的なうえ、半年間続けて皆で一つの音楽を作り上げる達成感もある。N響常任指揮者の外山雄三氏の指揮で名古屋フィルハーモニーをバックに、250人近いメンバーが、岡崎市民会館で、年末に毎年1,500人近い聴衆を前に歌うのだから、中途半端ではない。そしていつのまにか、10年間も歌い続けていたというのが実情である。

この活動を通じ、運営にも一時関わったお陰で、それなりに表裏を知ることもでき、多くのことを学んだ気がする。まず、アマチュアの集まりであるから、年齢幅は高校生から70歳を越えている人もいる。職業も、主婦、中・高・大・院の学生、サラリーマン、自営業、公務員、医師、教師、弁護士などさまざまあり、歌のレベルも経験も、千差万別である。そんな集まりであるから、運営をするにも考え方の違いが多く、侃侃諤諤になることもある。しかし、よりよい歌を作り上げ、舞台に立つことの一点で共通しているから、何とか不一致を乗り越えて続けられたと思う。でも、10年近くも続いているとマンネリを克服することが大変である。それが少し自分で

も危うくなってきたこともあり、そろそろ別なことをしたいこと也有って2年前に退会したが、しばらくは金曜日の夕方は何となく手持ちぶさたで、寂しかった。

ここで多くのことを学んだ気がする。一般に組織は、ヘテロな集団で構成され、その中の各集団がきちんと機能することで、より大きな組織が動いていく。そのためにも各集団がそこで求められる機能・役割をきちんと果たさねばならない。合唱は音程によりパートに別れ、バス、テノール、アルト、ソプラノがきちんと歌うことでのアンサンブルが成り立ち、音楽となる。最後には、合唱が、ソリストと一緒にになって、オーケストラと一緒にならなければならない。勿論、ここらは指揮者の腕の見せ所であるが、半年間の成果をどう表現できるか、ステージにのぼれば一発勝負の緊張の連続で、やり直しはきかない。一人の声の良い人が、大声を出せばよいというわけではなく、ここでは他のパートの響きを聞きながら自らがそこに声を合わせるアンサンブルが重視される。

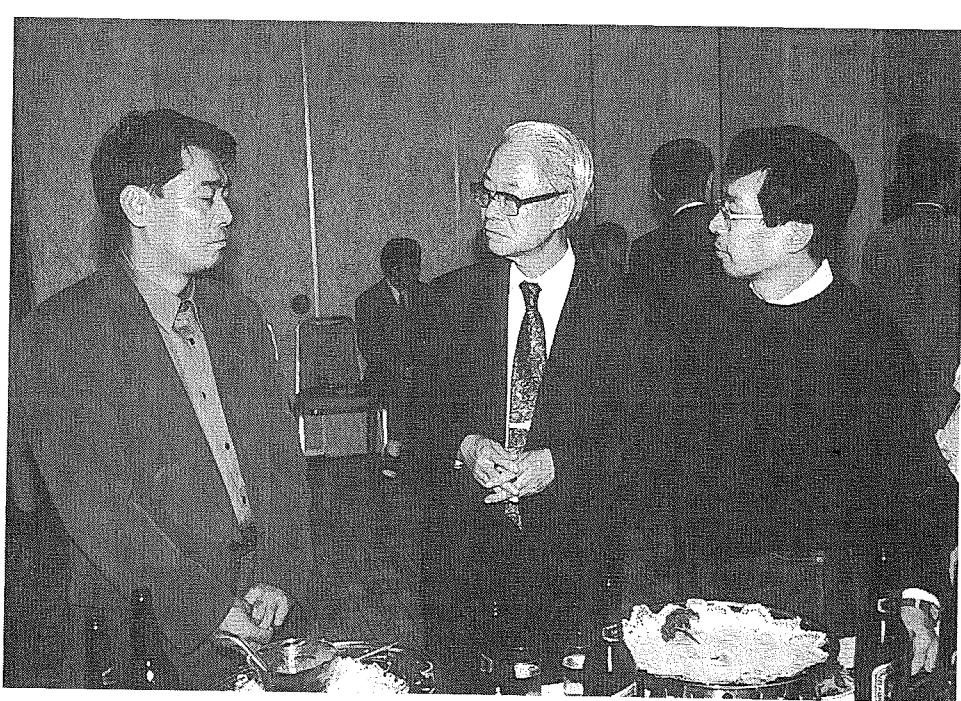
こじつけになるかもしれないが技術課と研究者組織と事務組織の関係も常にアンサンブルが求められる。技術課(基生研と分子研の技術課の違いもあるので、ここでは基生研技術課と限定する)は、「研究を専門技術をもって支援する」組織である。その支援内容は、技官それぞれの力量によって異なるが、役割については基本的な一致点があり、(はずである)、研究所の全体の研究の発展にどう寄与するかにかかっている。研究系に所属する者は教官(組織)の要望に応えて、それぞれの役割を果たすことになり、施設系の場合は、施設における客観的な役割を認識しその運営方針にそって業務を遂行することになる。だから、各人はそれに従っていわれるままにすれば良いということでは決してない。むしろ、その中で各人がどうしたら機能的に、あるいは効率的に技術支援が出来るかに創意工夫を発揮する必要があり、各人の主体的力量に負うところが多いのはいうまでもない。確かに、日常業務の大部分はルーチンに処理してすむ場合が多いが、その中で時には立ち止まり、どうしたらこの業務が効果的に役立つかについて、自問自答し研鑽する必要がある。そのためにも常に知識の幅を広げながら工夫する努力と、一年ぐらいをめどに仕事をまとめ発表することにつとめ、日頃は技官どうしで情報交換しあい、時には教官を交えて議論するチームワークが必要である。「第九」という曲は、バスの私にとって音域が広すぎ、一番

高い音はかなり努力してもでない。ドイツ語の発音もメロディーもやればやるほど難しさがわかつてくる。だから10年も続ける羽目になったが、合唱は個人がいくら大声を張り上げても声が少しも響かないときがあるし耳障りな声が飛び出すこともある。少しボリュームを落とし、周りの声を聞いて自分の声を出した方が、遠くに声が響き、美しいハーモニーとなる場合が多く、そのときの楽しさは格別である。一人一人が勝手に大声を張り上げても決して音楽にはならない。

技術者の仕事はもちろん各人の力量が最大限發揮できる環境が必要であることはいうまでもないが、その中で教官や研究者との、あるいは教官組織と事務組織と技術課組織が、うまく連携できアンサンブルを作り上げる環境ができれば、一つのハーモニーとなって研究所が大いに活性化されるに違いない。幸い、分子研は酒井課長の

もとで新しいスタートが始まった。従来の伝統的な良き面の継承はもとより、新しい音色が響きわたる事を期待している。

特に、岡崎機構のような技官がまとまった組織は、日本の研究機関としてきわめて特異な位置を占めている。ここに於ける技官の役割は、全国の技官にとって注目的であることはいうまでもない。研究と技術、研究者・教官と技術者のあり方には、まだまだ克服すべき課題が山積している。これらの困難を研究所間の研究分野の違いを乗り越えて、今後3研究所の技術課が手を携えて協力しあい、機構の研究の発展に大きく貢献できるよう、そしてそこに技術課があることをアピールできるように共に頑張っていきたいと思う。そしてそれが、この「鼎」の精神のようにも思う。



(左端：新技術課長)

トピックス

内田章前技術課長退官

15年の長きにわたって技術課長を勤められた内田章氏が、平成7年9月30日をもって退官されました。内田氏は、分子科学研究所創設間もない昭和54年4月に東京大学物性研究所より赴任され、昭和55年には技術課長に就任されました。中でも UVSOR の建設、放射線業務の安全管理に対し多大な貢献をされました。

さらに、技術課のみならず、分子科学研究所はもとより岡崎国立共同研究機構の発展に尽力されました。特に、組織を越えた技官の技術交流、日頃欠かすことのできない技官－研究者－管理局間の調整、地域住民との交流など実に多岐わたりご活躍になりました。

退職に寄せて

第一技術班長 松戸 修

内田前課長、長い間の職務、御苦労様でした。私は約16年前に分子研に赴任し、渡辺助教授、内田課長の御指導の元、UVSOR 計画に参加させて頂きました。渡辺助教授と組む仕事と内田課長と組む仕事の2種類があり、課長とは設備がらみの仕事が多かったように思います。内田課長は、建物・設備の他に入射・出射のパルス・マグネットの設計・製作にも御尽力されました。UVSOR 計画の実現に内田課長の果たした役割は非常に大きかったと思います。

15年前の12月29日にUVSOR の予算にGO が出て首脳人が紙製の兜を被り、子供の様に喜んでシャッターを切られたのが昨日の様に思われます。寡黙な人でしたが、

私に対しては長い目で見て頂いた気がします。回路・機械・加速器など、ほとんど知らない私を良くも使い続けて頂いたものだと思います。課長は顔は怖いですが、やさしい人です。ただ非常に厳しい人です。なぜならば、自分から積極的に人に教える方ではありませんでした。こちらも無知を笑われるのが嫌で独学で多くの事を学びました。SOR 発光の原理・電子軌道計算・安全装置の設計製作等で。ドアスイッチ・非常停止スイッチ制御装置の製作では暫定的な使用ということで製作しました。とてもではないが他の加速器施設に設置されている立派な状態表示装置は私に作る能力はありませんでした。しかし、私の製作した表示盤は無様な姿を制御室のメイン・

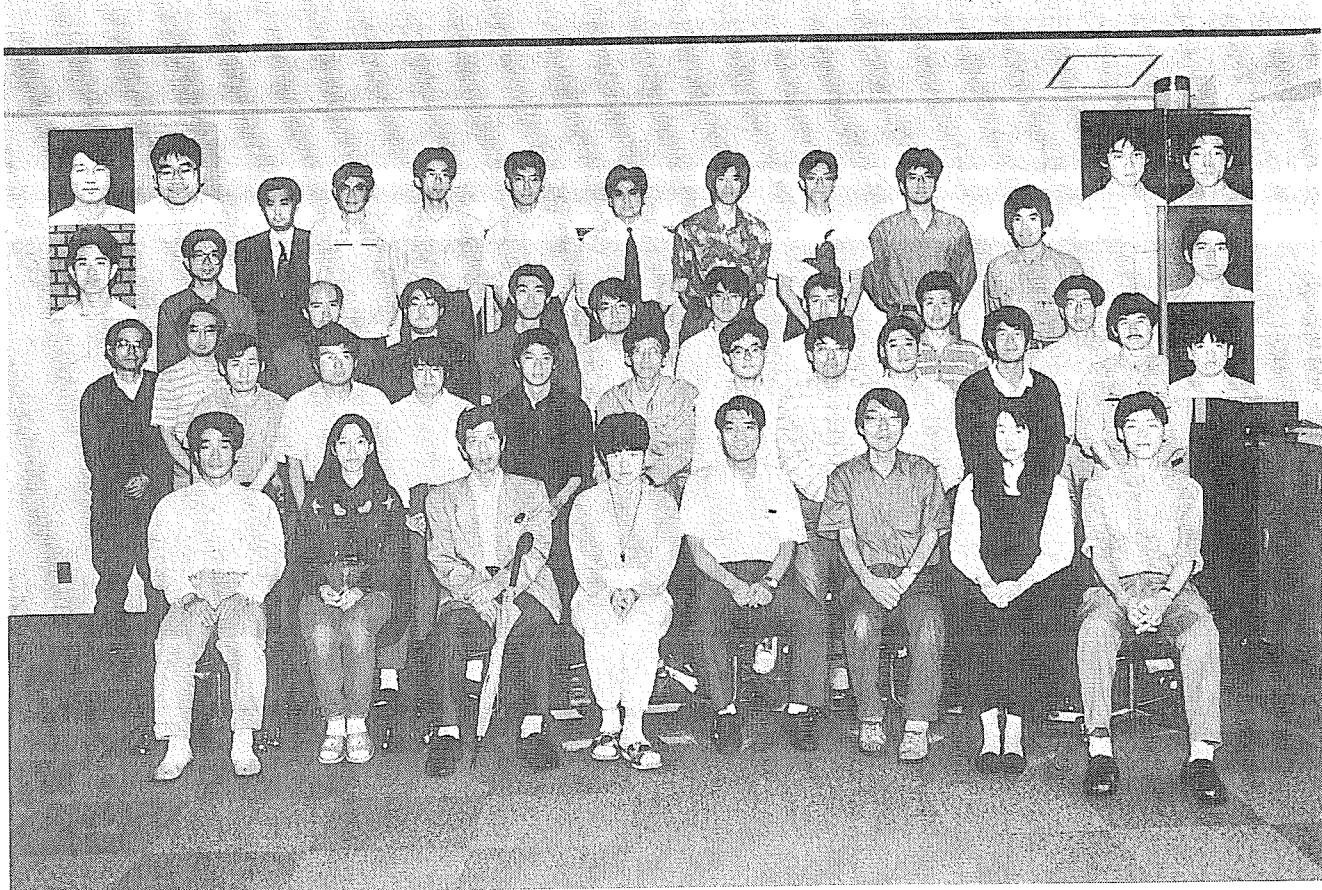


ラックに鎮座したままです。安全装置としては機能しています。現在、思えば、見事に課長にはめられた気がします。

さて、分子研及びUVSORからは離れて、個人的に御付き合いをさせて頂いた話をさせて頂きます。課長と私は25年前、東大物性研で出会いました。課長は労組の副委員長で私は執行委員でした。当時は70年安保の時代と一緒にデモをしたりしました。麻雀や競艇などを教えても頂きました。一緒にスキーにも行きました。しかし、滑る姿を見たことはありません。なぜかというとゲレンデに出て来るなり、「寒い！」の一言ですぐに旅館に戻ってしまうからです。それにしても、優しい人でした。ある日、私が物性研で麻雀につかまっていると、家が近

くなもので、「先に原宿で待っているぞ。一緒に帰ろう。」とおっしゃられ、後刻、駆けつけると、待っていて下さって、「どんどん飲め、食え」とおっしゃり、帰り際、一言おっしゃいました。「払いはまかした」。25年間もの長き間、お世話させて頂き有難うございました。お元気で！！

(2枚のスナップ写真は平成7年9月18日に行われた退官記念送別会に撮影されたものです。)



平成7年6月 技術課職員記念撮影

シリーズ特集「S i」

シリコン表面の酸化反応

基礎電子化学研究部門 松本吉泰

1. はじめに

川副さんの合成石英(SiO_2)、宇理須さんのSOR光を用いたシリコン表面反応、田中さんのシリコン表面研究の技術的側面、間瀬さんのシリコン単結晶表面の清浄化の技術と続いてきたこのシリーズに私も何か書けと言うことですので、ここではシリコンの酸化反応について私の研究グループの最近の研究結果をまじえて紹介したいと思います。シリコン表面の酸化は半導体であるシリコンに絶縁層をつくるため応用面で大変重要なことですが、その反応の初期過程や表面構造を理解することは学術的にも後に述べるよういろいろ面白い問題を提供します。

シリコン表面の特徴は何と言ってもその表面構造にあります。シリコンの結晶は構成原子であるシリコンが互いに隣接する4個のシリコン原子と共有結合をしてダイヤモンド構造を持っています。これをある面で切断すると、切断面にあるシリコン原子は結合の相手の一部がいなくなるために不安定になり、いわゆるダングリンボンドと呼ばれる非常に指向性の高い電子軌道が残ってしまいます。この状態では熱力学的に不安定ですので表面原子は互いに再配列し、エネルギー的に低い状態に移行します。このようにして、特徴的な再配列構造ができ、対称性の良い(100)面や(111)面でも表面は原子スケールで見るとかなり起伏の大きなものとなります。各々の面の詳しい原子配列については田中さんの解説を参照して下さい。

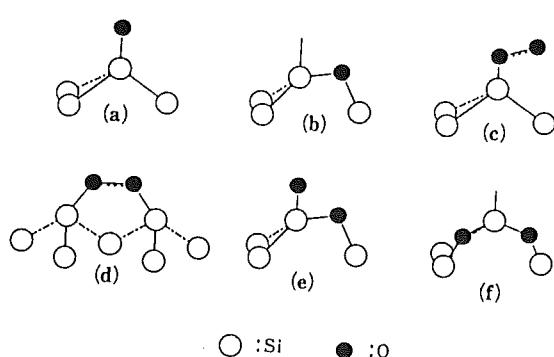


図1 Si(111)表面における酸素吸着構造のモデル。

白丸：シリコン原子、黒丸：酸素原子

2. シリコン表面での酸素の吸着構造

シリコンの酸化反応は半導体工業において大変重要なため、多くの研究が行われていますが、その多くは酸化剤として酸素分子を用いたものです。酸化された表面構造や酸素の吸着状態を高分解能電子エネルギー損失分光(EELS)やX線光電子分光(XPS)などのいろんな手段で調べられており、 $\text{Si}(111)$ 表面では図1にあるような様々な酸素吸着構造のモデルが提唱されています。一方、 $\text{Si}(100)$ 表面では図2にあるように隣接した表面原子間に酸素が挿入された構造をとると考えられています。表面を長時間酸素分子に露出しておくと徐々に酸化層が成長し、結晶表面は SiO_2 の層で覆われることになります。

3. 原子による酸化反応

私達はこの酸化反応の初期過程に興味を持ち研究を始めました。前述しましたように酸化剤としては酸素がポピュラーですが、この場合酸化がどんどん内部に進行していく

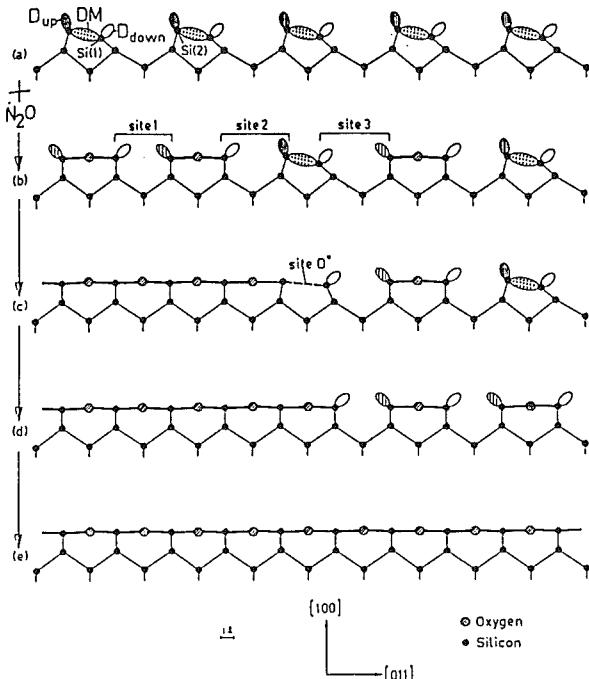


図2 Si(100)表面における酸素吸着構造のモデル。

(a) 清浄表面、(b)～(e)の順に表面酸化が進行する。

ため、私達は N_2O を用いて実験を行いました。 N_2O は表面で熱反応によって酸素原子と窒素分子に分解しますが、窒素分子はこの表面と強く相互作用しないため単に真空中へと脱離してしまいます。したがって、 N_2O は酸素原子のソースとして考えることもできます。

まず、低温($< 60\text{K}$)に保った Si(100) 面に N_2O を露出し、 N_2O を表面に吸着させます。この温度では N_2O は反応せず、表面に弱く分子として吸着しています。そこで、表面の温度を上げると表面第一層に吸着した N_2O は一部脱離しますが、ほとんどが分解し表面のシリコン原子を酸化します。酸化して表面に残った酸素原子の量と N_2O の被覆量との関係を調べてみると、図 3 にあるようにある被覆量以上ではほとんど残存する酸素原子量は一定となり、酸化反応があるところで飽和することが解ります。これは、室温付近の比較的高い表面温度で N_2O に露出しても同じようなことが起こります。すなわち、酸素分子を酸化剤として用いるのに比べて N_2O では表面第一層が酸化されると自動的に反応が停止すると言う大きな特徴があります。

それでは、 N_2O による酸化反応をもう少し詳しく考えてみましょう。図 4 は低温で N_2O を吸着させた表面での昇温脱離の結果です。昇温脱離法(TPD)というの

は吸着表面の温度を直線的に上げながら目的とする脱離種を質量分析器で観測する測定方法です。この方法は間接的ではありますがこの結果から吸着状態の情報や、脱離や解離反応の速度論的な情報を得ることができます。例えば、脱離する温度は吸着種の吸着の強さと関連しますし、TPD のスペクトルの形状から脱離や反必の次数を知ることができます。さて、図 4 には二つの系統の TPD の結果を示してあります。一つは N_2O の質量数に固定して様々な初期吸着量に対して測定したものと、もう一つは N_2 の質量数に固定して測定したもので、用いた四重極質量分

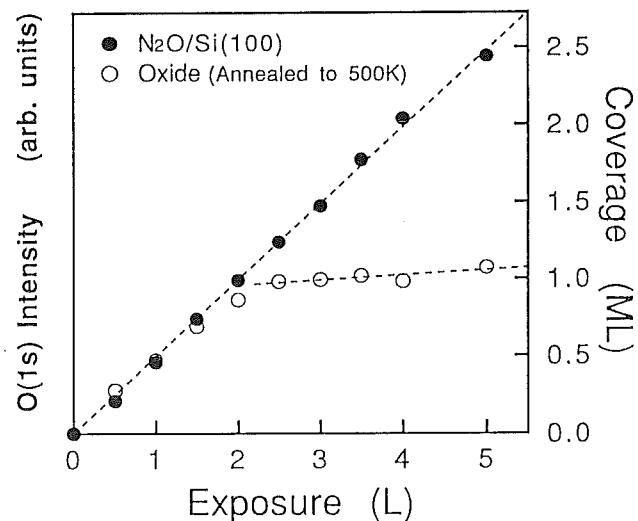


図 3 Si(100) 表面における酸素原子被覆量と N_2O の露出量との関係。表面を 60K において N_2O に露出した後、XPS の測定を行った。 N_2O の被覆量(黒丸)は露出量に比例して増加する。しかし、 500K まで加熱したのち、生成した酸素原子の被覆量(白丸)は 2 L 付近で飽和する。

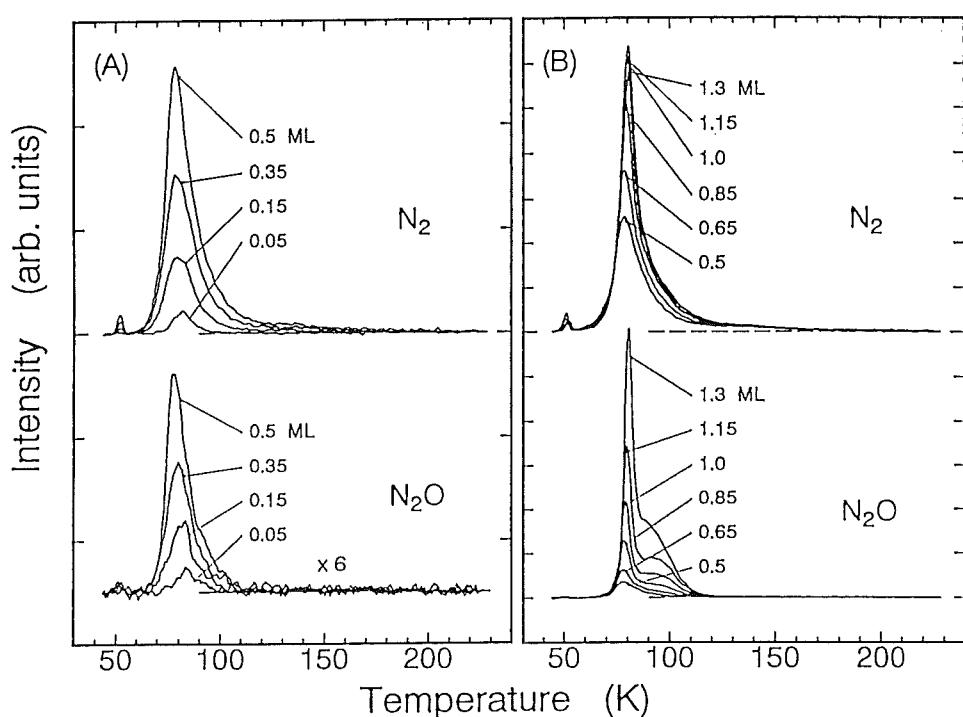


図 4 N_2O を吸着させた Si(100) 表面での昇温脱離。(A) は N_2O の被覆量が $0.05 \sim 0.5\text{ ML}$ 、(B) $0.5 \sim 1.3\text{ ML}$ 。

析器では電子衝撃型のイオン化を行っているために当然 N_2 の質量数の信号には N_2O のフラグメントによって生じたイオンの信号が含まれますが、この図では既にそういう寄与は取り除いてあります。したがって、上段は解離片である N_2 の脱離、下段は N_2O の分子状脱離を示しています。これから、まず明らかなことは 80K 程度で既に N_2O は脱離と解離(酸化)を起こすと言うことです。また、更に詳しくこの結果を解析すると N_2O の被覆量が 0.5ML 以下、すなわち、第一層に吸着した N_2O においては 90% が解離し、残り 10% 程度が脱離すると言うことがわかりました。

N_2O を用いることの一つの面白さは上記のように二種類の脱離種、 N_2O と N_2 を同時に測定できるために、脱離と解離の両チャンネルを調べることができます。そこで、これらの TPD の結果を Polanyi-Wigner タイプの速度式、

$$r = v_n(\theta)\theta^n \exp(-E_a(\theta)/RT)$$

を用いて解析します。ここで、 r は反応速度、 θ は N_2O の被覆量、 n は反応次数、 v_n と E_a は頻度因子と活性化エネルギーです。解析した結果を図 5 に示します。頻度因子と活性化エネルギーには相関関係があることがわかりま

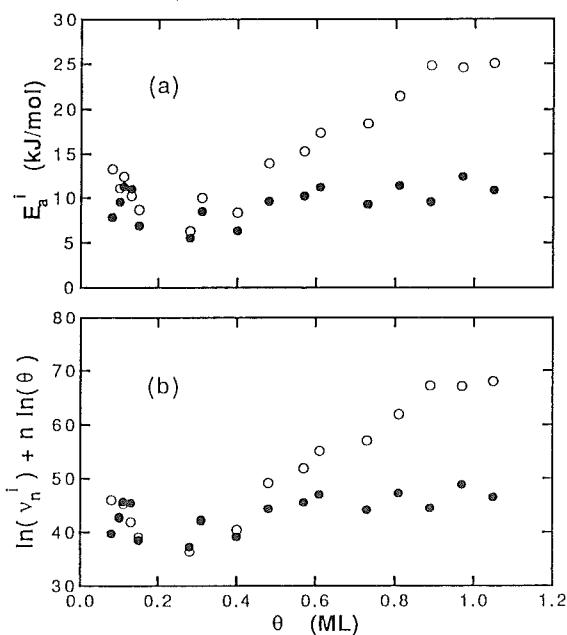


図 5 Si(100) 表面における N_2O の脱離(白丸)と解離(黒丸)の (a) 活性化エネルギーと (b) 頻度因子の初期被覆量依存性

すが、注目したいのは解離に関するこれらのパラメータが初期被覆量にほとんど依存せず一定なのに比べて、脱離のそれは 0.5ML 以下では解離とほとんど同じにもかかわらず 0.5ML 以上では大きくこれから逸脱して行きます。これは何を意味するのでしょうか。また、もう一つ不思議なことは 0.5ML 以下では両過程とも $10^5 \sim 10^6$ S^{-1} と言うたいへん小さな頻度因子の値をとります。特に、通常脱離過程では 10^{12} 程度の値が観測されていることを考えますとこれは非常に異常な結果と言えます。

このような異常性を説明するために私達は次のようなモデルを考えました。すなわち、(1)吸着 N_2O はある温度で解離の活性エネルギーを越える十分な熱エネルギーをもらい窒素分子と酸素原子に解離します。(2)酸素原子は速やかに表面のシリコン原子と反応し、Si-O 結合を形成します。この時、大きな生成熱が生じるはずですがこれは表面ならびにバルクの原子間の振動運動へと転換され、エネルギーは散逸してしまします。(3)しかし、もし解離によって生じた酸素原子と反応する表面シリコン原子のすぐ近傍に N_2O が吸着していたならばどうなるでしょうか。 N_2O は酸素原子がシリコン原子と反応するのを傍観者として単に見ているだけでしょうか。私達は、このエネルギーの一部がシリコンと N_2O の間の振動モードに移行し、 N_2O の脱離を促すのではないかと思っています。また、酸素原子が 2 つのシリコン原子の間に挿入され Si-O-Si 結合をつくると、原子間の結合距離が酸化反応以前の Si-Si 結合の長さと異なるため幾何学的に構造が歪むことが考えられます。このような構造変化が N_2O の脱離を誘導すると考えられるかもしれません。これは、まだ仮説の域を出ませんが今まで表面で生成されたエネルギーによってどのように他の反応過程が誘起されるのかと言う点についてはあまり研究例が無く、この後、この仮説を裏付けるような実験を計画しています。

4. $N_2O / Si(100)$ での光反応

私達は同じ吸着系について光反応の研究もしています。気相でも N_2O は 200nm 付近の紫外光によって光解離することが知られていますが、シリコン表面上ではもっと長い波長の光によって解離することがわかりました。そのメカニズムなどについてはまた他の機会に譲ることとし、ここでは吸着種の構造と関連した話をしましょう。

先程述べた N_2O の吸着状態としては物理吸着のみについて述べましたが、実は、表面が一部酸化されるとともに強く表面と結合した N_2O の吸着状態があります。このような化学吸着状態の N_2O は、低温で N_2O を物理吸着させた後、昇温したり、また、95K 程度に表面温度を保ったまま表面を N_2O にさらすことによって生成するこ

とができます。ここでは、このような比較的強く表面と吸着した N_2O の光解離について述べます。

この N_2O 吸着表面に 350nm より短い波長の光を照射すると吸着 N_2O はやはり熱反応のときと同じように酸素原子と窒素分子に解離します。余剰エネルギーの一部が脱離する N_2 に与えられ、 N_2 はかなり高いエネルギーを持って表面から脱離してきます。この時の並進エネルギー分布を測定してみると速い成分では 1eV 近い平均エネルギーを持つていることがわかりました。これは、温度にして 6000K に近いもので、表面温度がせいぜい 95K であることを考えると、いかに大きな並進エネルギーを持っているかがわかります。この事からも、 N_2O の解離は光照射によって生じる熱による反応ではなく、何らかの電子励起状態が関係していることがわかります。

さて、奇妙なことはこの N_2 の脱離の空間分布です。 N_2 の脱離量を脱離角の関数として測定したものが図 6 です。平坦な表面から熱脱離してくるものは通常表面法線方向にピークを持つことが広く知られていますが、この場合法線から約 30 度傾いた方向に際立って強く N_2 が脱離してくることがわかります。どうしてこのようなことが起こるのでしょうか。

私達はこれは表面に吸着している N_2O の分子構造に由来しているのではないかと思っています。最初に書いたようにシリコン表面にはダンギングボンドなど非常に

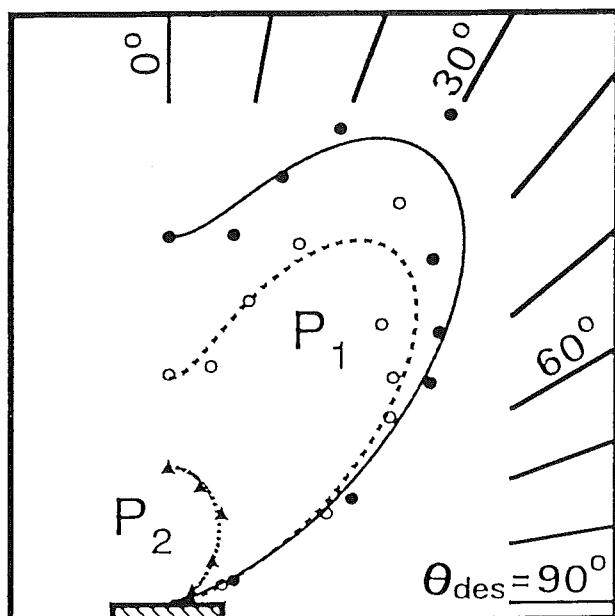


図 6 部分的に酸化された Si(100) 表面に化学吸着した N_2O の光解離片 (N_2) の脱離角依存性。 P_1 と P_2 はそれぞれ平均並進エネルギーが 0.91eV と 0.28eV を持つ速度成分。

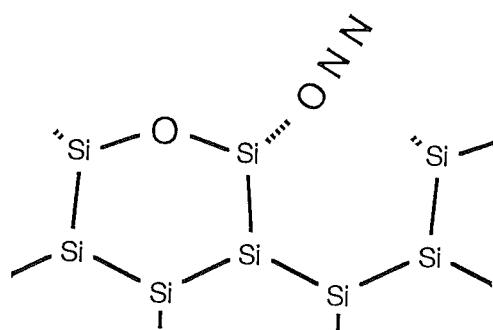


図 7 部分的に酸化された Si(100) 表面に化学吸着した N_2O の吸着構造のモデル。

指向性の高い結合手があるわけで化学吸着した分子は当然でたらめな配向をして表面に吸着するのではなく、そのダンギングボンドとの結合によりある定まった配向をして吸着していると考えられます。例えば、図 7 に示したような構造で N_2O が吸着していた場合、光解離によって表面から脱離してくる脱離種の空間分布はこのような配向を反映した空間的に異方性のあるものになると考へられます。もちろん、これは N_2O の解離の結果 N_2 が N_2O の分子軸の方向に飛び出すことを仮定していますので、もし、分子軸の方向ではなく、分子軸に対してある角度を持って解離するようなポテンシャル面によって解離のダイナミクスが規定されているのであれば、この空間分布から直接どのように吸着 N_2O が配向しているのかを推定することはできません。しかし、ここで言いたいのはこのような空間分布の異方性はいずれにしても N_2O の配向の異方性、強いては、シリコン表面原子が持つ異方性のある吸着場に起因するものであると言うことです。このような、脱離種の空間分布から吸着種の配向や結合角を推定する方法としては ESDIAD と言う方法がありますが、これと事情はよく似ています。しかし、ESDIAD の場合は 100eV もの高いエネルギーを持った電子を衝突させることによって吸着種の高励起状態に励起し、そこから生じるイオン脱離種を検出するのに対して、本研究ではせいぜい数 eV の光を用いると言う違いがあります。

5. おわりに

以上、私のグループのシリコン表面の酸化反応に関する研究の一部を紹介しました。前回までのシリーズでシリコン表面の清浄化法などが書かれていましたが、シリコン表面は金属表面とまた違った実験上の困難があります。この研究は、総研大の学生の加藤浩之君がこれらの困難を克服しながら粘り強く行った実験の成果です。

技術活動報告

He 原子のレーザー冷却

分子構造研究系技術係 熊倉 光孝

1. はじめに

近年のレーザー制御技術の大きな発展により、これまで困難であった中性原子の光による運動制御が可能となり、温度がmK～ μ K以下とこれまでにない極低温の原子気体の実現¹⁾や、原子の光学、原子の波動性の利用²⁾といった新しい分野が開かれつつある。

電荷を持ったイオン、電子などについてはクーロン力やローレンツ力により真空中に捕捉したり、その運動を制御することが可能であり、加速器、SORなどに見られるようにその応用はこれまでに大きな成功を見せている。しかしながら中性原子の運動制御についてはこれまで利用可能だった手段は磁場との相互作用を利用したもので、これは一般的に実現可能な電場、磁場で比較してみるとイオン等に比べてその力は 10^{-4} 程度でしかない。そのため中性原子の運動制御はイオンなどに比べて非常に困難で、これまでには大型の超伝導磁石を用いた原子の真空中での捕捉や不均一磁場による原子線のわずかな方向変化などが試みられていました³⁾。

一方、この中性原子の運動を光を用いて制御し冷却するという考えが1975年にT.HanschとA.Schawlow⁴⁾によって提案された。これは原子に共鳴周波数近くの光を照射し、効率よく光の吸収、放出

を繰り返させ、その際の光子による反跳を利用して原子に大きな力を与えて運動を変えるというものであった。この実験的な実現には、スペクトル幅が原子の共鳴線幅と同程度かそれ以下の狭帯域で、かつ高輝度の波長可変な光が必要であり、近年の波長可変連続発振レーザーの大きな進歩によってこのような実験が可能となった。まず1980年、V.I.Balykinら⁵⁾によってナトリウム原子線の減速がこのような連続発振シングルモード色素レーザーを用いて行なわれ、1985年にはS.Chuら⁶⁾により3次元的に原子

がレーザー冷却され、真空中でレーザー光の中に $240\mu\text{K}$ の極低温ナトリウム原子約 10^5 個を捕捉することに成功した。このうちレーザー冷却の技術は様々な原子に適用され¹⁾、またさらに低い温度を目指した新たな冷却法¹⁾も提案され、実現されてきた。そして現在、レーザー冷却によりRb原子などについてボーズ凝縮状態⁷⁾が実現され、また原子の干渉を利用した実験²⁾なども試みられ、このレーザー冷却によりこれまで到達不可能であった極低温での物理や原子の集団的な量子性の物理、レーザーによる原子の光学などあらたな分野が生まれて来ている。

一般的なレーザー冷却の仕組み、様々な発展については、これまでに詳しい総説^{1), 2)}も多数出ており、またここでは紙数の制限もあるので詳しくは後述の文献を参照して戴くこととし、以下では我々のグループで行なってきたHe原子のレーザー冷却の実験の概要⁸⁾について主に装置の面から紹介したい。

2. レーザー冷却の対象としてのHe原子

He原子はレーザー冷却可能なもっとも軽い原子のひとつで、冷却後の極低温状態で多くの他の原子と比べてde Broglie波長が長くなり、原子の波動性が顕著に現われやす

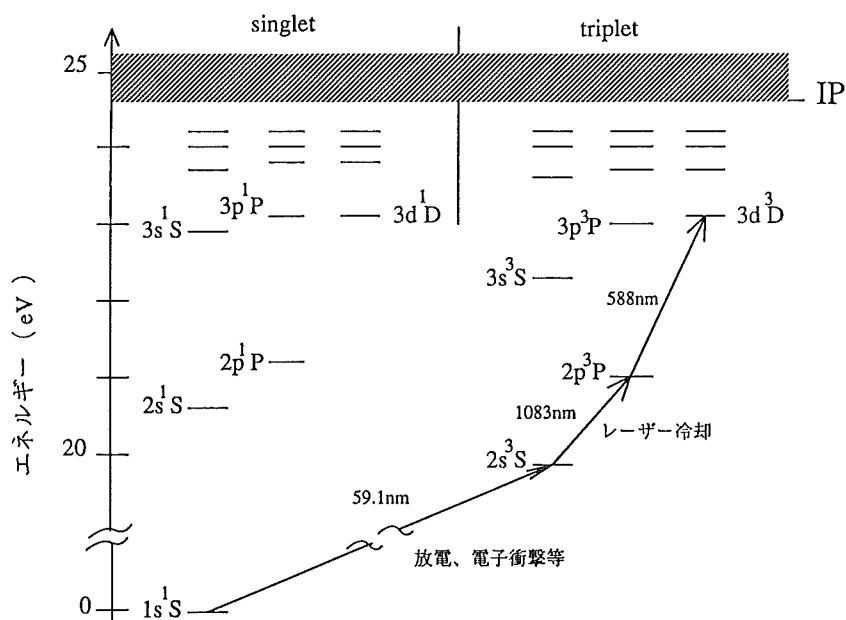


図 1. He 原子のエネルギー準位図

いと考えられ、レーザー冷却の対象として非常に興味深い原子である。また、He原子はもっとも構造の簡単な原子のひとつで実験と基礎的な理論の比較が明確に行ないやすいことや、統計性の異なる同位体³Heが高価ではあるが手に入り、極低温原子気体での原子衝突や量子的な集団効果への原子の統計性の影響の観測などが期待され、非常に重要な原子でもある。

しかしながら、このような利点であるHe原子の軽さや構造の単純さは、冷却に用いる遷移の性質などとあいまつて、He原子のレーザー冷却実験の実際的ないくつかの難点ともなっている。それらHe原子のレーザー冷却の特徴についていくつか挙げてみる。

1) 準安定状態 $2s^3S_1$ 状態のHe原子を冷却

図1に示すようにHe原子では、基底状態からの遷移には真空紫外光以上のエネルギーが必要で、現在利用可能な連続発振レーザーの発振波長域がせいぜい近赤外、可視、紫外外域でしかないため、レーザー冷却可能なHe原子は準安定状態の $2s^3S_1$ 状態（寿命 7900 sec）である。

このHe原子の準安定状態 $2s^3S_1$ は基底状態から19.8eV エネルギーが高く、この $2s^3S_1$ 状態を生成するためには放電や電子衝撃などでHe原子を励起してやる必要がある。そのためヘリウムではナトリウムやルビジウムなど基底状態で冷却が行なえる原子と比べて元々の原子ビームの強度があまり強くできない。またトラップ後の極低温気体中で準安定He原子同士の衝突によってPenningイオン化、associativeイオン化等が比較的大きな速度で起こり、それによるトラップからの損失がある。そのため、アルカリ金属など他の原子と同程度の個数トラップするためには大強度の準安定He原子線源が必要になる。

2) 近赤外光による $2s^3S_1 \rightarrow 2p^3P_2$ 遷移の利用

He原子のレーザー冷却には準安定状態である $2s^3S_1$ 状態から $2p^3P_2$ 状態への遷移 ($\lambda = 1083\text{nm}$; 上準位の寿命 98 ns) を用いる。

この遷移は近赤外光であり、検出感度が可視光に比べて1桁以上悪く、トラップの個数、密度などの測定のために、検出感度の高い可視光の遷移 ($2p^3P_2 \rightarrow 3d^3D_3$; $\lambda = 588\text{nm}$) を利用することや、さらにできるだけ強い準安定原子線源を製作するような必要がある。

一方、この遷移を利用すると、近赤外光では1光子当たりの運動量が可視光の場合より小さく、原子の反跳の運動量も小さくなり、反跳限界の温度もより低くなる。またこの遷移は上準位の寿命が比較的長く、共鳴線幅が1.6MHz

と狭いためDoppler冷却の限界温度も $40\mu\text{K}$ と小さい。精密な運動コントロールやより低い温度を実現するには共鳴線幅よりも十分スペクトル線幅の狭いレーザーが必要であるが、このような点はこの遷移を用いる利点にもなっている。

3) He原子が軽い為に原子線初速度が大きい

気体の原子、分子の速度分布はMaxwell分布にしたがい、その最確速度は $(T / m)^{0.5}$ に比例する（温度 T、質量 m）。質量の小さいHe原子では、常温でもその速度は約 2000 m / sec と非常に大きい。ここで少しレーザー光によつてHe原子に加えられる力について見てみる。この共鳴遷移でHe原子に吸収・放出される光子 ($\lambda = 1083\text{nm}$) の運動量は単位光子当たり $6 \times 10^{-28}\text{kg} \cdot \text{m/sec}$ 、飽和時の単位時間当たりの光子散乱回数は 5×10^6 回 / sec で、原子の減速度はレーザー光が十分強く飽和しているとき $5 \times 10^5\text{m/sec}^2$ となることがわかる。このことから常温の初速 2000 m / sec の He 原子が停止するまでに、少なくとも 4 ms の時間と 4 m の距離が必要となることがわかる。実際にはできるだけトラップを低温にするためにはレーザーパワーは弱いほうがよく、停止にかかる距離はさらに長くなるので、非常に大掛かりな装置が必要となってしまう。そこで、できるだけ初速の小さな準安定状態 He 原子ビームを得ることが必要である。

これらの点を解決して He 原子をレーザートラッピングするために、液体窒素で冷却した放電ノズルソースに、原子ビームの広がり速度を 2 次元的にレーザー冷却する原子ビームのコリメーションを組み合わせた、大強度の低速準安定 He 原子線源と、LNA という結晶をゲイン媒質に用いたアルゴンイオンレーザー励起のリング型シングルモード CW レーザー⁹⁾を製作した。そして、Zeeman 同調法¹⁰⁾により He 原子のレーザー減速を行ない、4 レーザービーム型の MOT¹¹⁾にトラップしてやった。その結果、現在⁴He 原子とその同位体³Heについて $400\mu\text{K}$ 程度で約 10^5 個の He 原子を 10^{-4}cc の領域に閉じ込めることができている。

3. 実験装置

実験装置の主な部分について、原子ビームの装置とレーザー制御システムに分けて説明する。

1) 大強度低速準安定He原子線源（図2）

準安定He原子は液体窒素で冷却されたヘリウムガス槽

液体窒素冷却放電ノズルソース

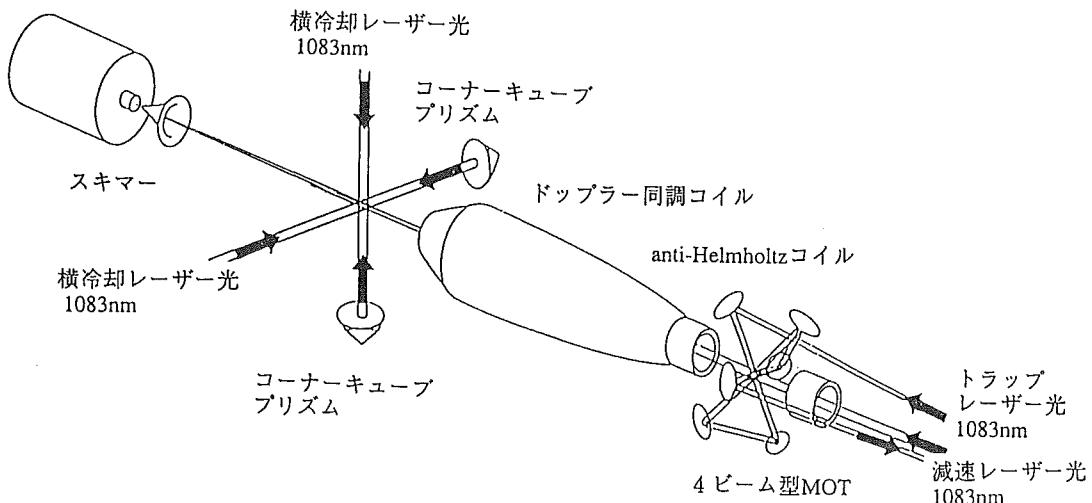


図2. レーザー冷却実験装置

の中でdc放電を行なうことで生成し、ノズルから真空中に吹き出す。このほんの一部をスキマーで切り出し、差動排気によって原子ビームとする。ノズルから放出されたHeガスの99.9%以上の大部分はスキマーで初段の差動排気系に残り、拡散ポンプにより排気される。 ^3He の実験では、 ^3He ガスが非常に高価な為、このポンプの排気中のHeガスを回

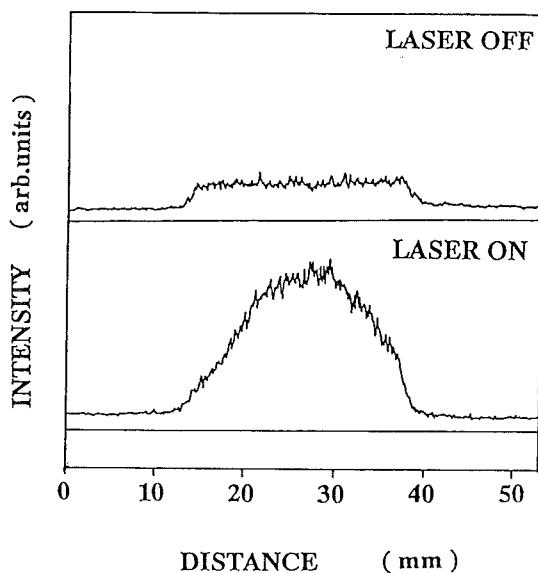


図3. 原子線横方向速度のレーザー冷却の効果

ノズルースリット間距離=約80cm

ノズルー横冷却域間距離=約95cm

ノズルー検出器間距離=約3.9m

スリット口径 2mm

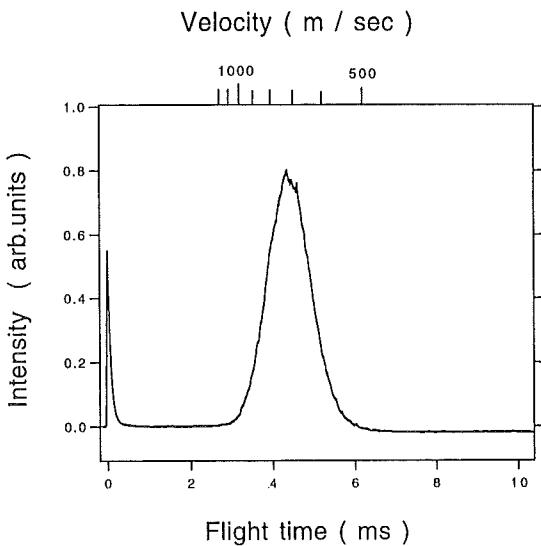
収、精製して再利用している。

この準安定He原子ビームは、原子ビームに垂直な4方向からレーザー光を照射して、原子ビームの横方向への広がりの速度を減速してやる。原子ビームはレンズを通ったようにコリメートされ、広がらないまま大きな強度で減速・トラップ領域まで導かれる。図3はこの横方向速度の冷却の影響を示すもので、トラップ領域近くでの原子線の空間的な強度分布を測定したものである。この横方向速度の冷却により、トラップ領域での原子線強度は約7倍増加している。また、図4にこの準安定He原子線のT.O.F.スペクトルを示す。最確速度が約740 m / secの低速で、約 10^{13} 個/sec · strの大強度の原子ビームが得られている。

この準安定He原子ビームは超高真空の減速領域、トラップ領域に導かれる。減速領域は約1.3 mあり、Zeeman同調法用のコイルにより外部から空間的に徐々に減衰する磁場がかけられる。trap領域は一組のanti-Helmholtzコイルと4 beam型MOTを構成するミラーからなる。MOTの磁場の傾きは約20 G/cmとなっている。この磁場が0となるトラップ中心にHe原子はトラップされる。このトラップの様子は、トラップからの蛍光を光電子増倍管やCCDカメラでモニターして原子の個数や密度を測定したり、またトラップの鉛直下方においていたM.C.P.により落下原子の速度分布やPenningイオン化によるHeイオンを測定することによって調べられる。

2) 冷却用レーザーシステム（図5）

原子のコリメーション、減速・冷却に用いるレーザー光のシステムを図5に示す。レーザー光は、LNAという結



放電のパルス幅は 0.1ms
 $t=0$ のピークは放電時に発生する光の信号である。

図4. He原子線のT.O.F.スペクトル

晶をゲイン媒質に用いたアルゴンイオンレーザー励起の自家製リング型シングルモードCWレーザーによって発生させる。このレーザー光は、スペクトル線幅のジッターが約0.5MHz以下となっている。このレーザー光の波長は、Heガス中での dc放電で生成した準安定状態 $2s^3S_1$ ($m=1$) から $2p^3P_2$ ($m=2$)への遷移に、飽和吸収分光法による信号を用いたフィードバック系によってロックしている。またこのレーザーの周波数は、放電しているHeガスに静磁場をかけてZeeman効果により共鳴周波数をシフトさせ

ることで、100MHz以上の広い範囲にわたって変化させることができる。原子のトラッピングに用いられるこれらのレーザービームをAOMによりスイッチ可能にするために、ロックに用いるレーザービームにも同じキャリヤー周波数のAOMからの出力を用いている。

ところで、このような近赤外域の狭帯域レーザー光源としては近年、アルゴンイオンレーザー励起のシングルモードTi:SapphireレーザーやDBR半導体レーザー¹²⁾などが開発され市販されている。強度、スペクトル線幅、安定度の点から現在、我々は2台のLNAレーザーによって実験を進めているが、今後のsophisticateした実験に、さらに多くのレーザーが必要になった場合、安価な半導体レーザーは非常に魅力的であり、その狭帯域化、周波数制御などに対する技術が望まれる。これらは高速のエレクトロニクスによるフィードバック技術や振動、熱揺らぎに対する超安定な機械技術などからなるものすでにスペクトル線幅1kHz以下の狭帯域化が世界的には実用されており¹³⁾、これらについて取り組んでゆくことは今後の我々の課題である。

4. 応用実験

以上のような装置でレーザー冷却し、トラップした極低温He原子を用いて、これまでにいくつかの応用的な実験を行なって来た。そのいくつかについて、以下に簡単に解説する。

1) トラップからの低速原子の透過型回折格子による原子波回折の観測

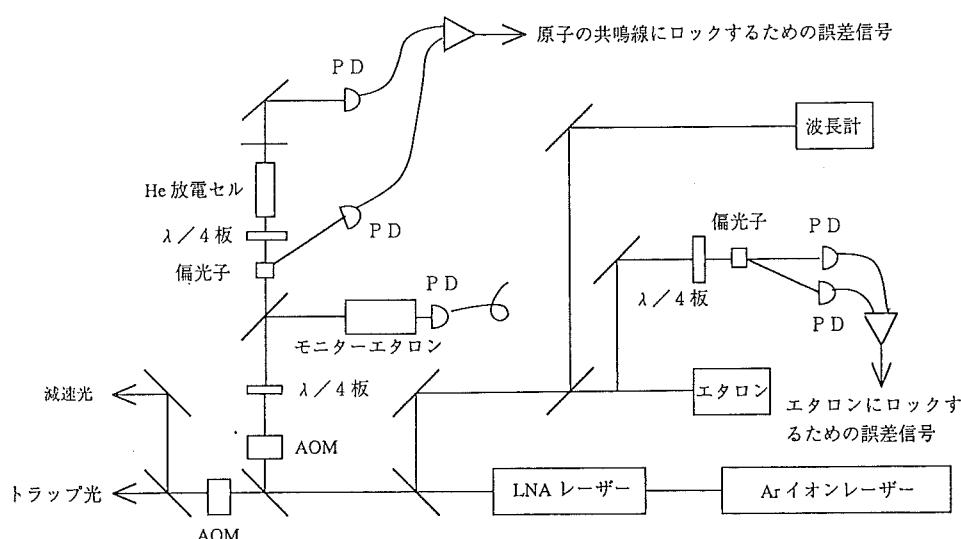


図5. レーザーシステムのブロック図

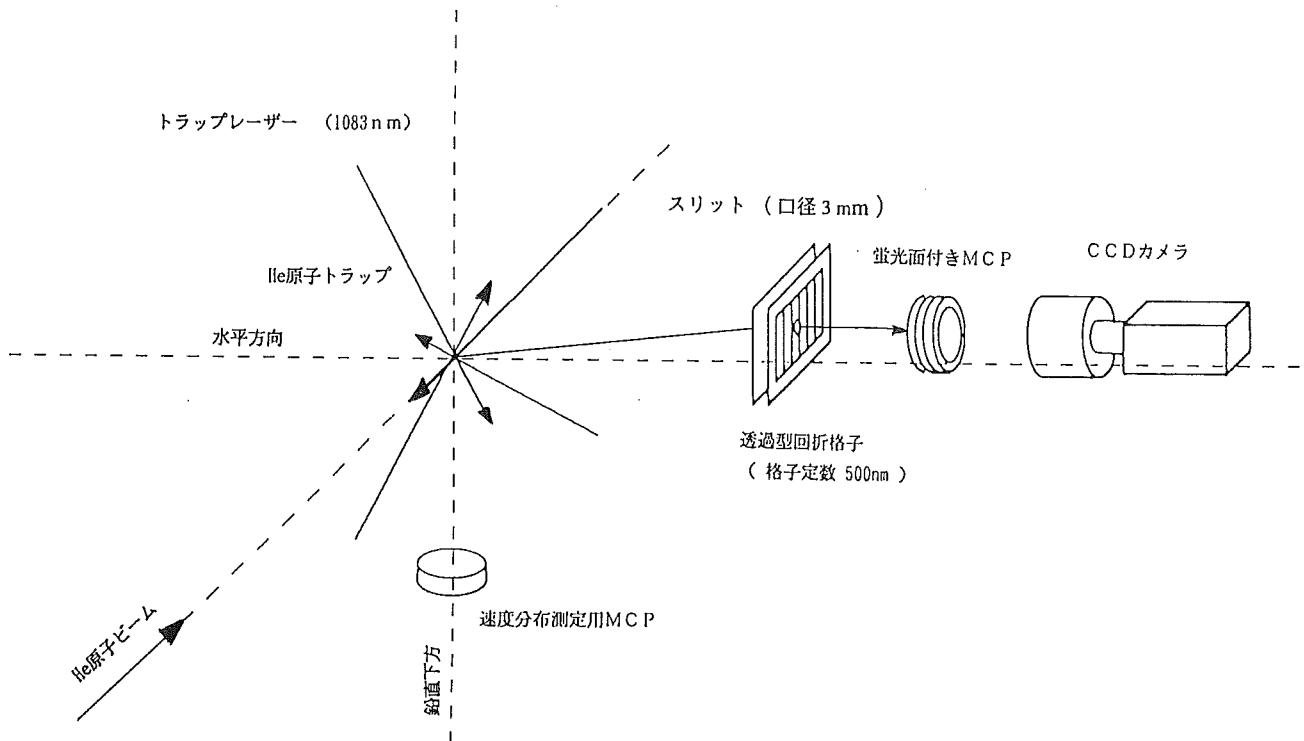


図6. 原子波の回折を観測するための実験装置

図6のように温度1.2 mK、個数約 10^5 個のトラップから、速度約2.7 m/secのHe原子をX線用の透過型回折格子（格子間隔 $d=500\text{ nm}$ ）に口径3 mmのアイリスを通して入射した。回折格子を通り抜けたHe原子は約5 cm後方の蛍光板付きM.C.P.とCCDカメラによって2次元的に検出される。

検出されたHe原子はアイリスの口径から予測される以上に広がり、回折角4.3度（変位約3 mm）のところにS/Nは良くないが1次の回折波と思われるピークが見られる（図7）。この回折角はde Broglie 波長になおして37 nmとなり、He原子の入射速度2.7 m/secにはほぼ一致しており、原子の回折格子による回折を観測しているものと考えられる。

このような巨視的な原子の波動性の研究はまったく新しい分野であり、例えば非常に敏感な原子の干渉計の実現などさまざまな応用が考えられ、さらなる進展が望まれる。

2) 極低温衝突によるPenningイオン化速度の統計性の異なる ^4He , ^3He 原子での比較

温度約400 μK の極低温において、準安定He原子同士の衝突イオン化によるトラップの減衰速度を、フェルミオンである ^3He とボゾンである ^4He について測定して比較した。トラップの2体の減衰速度定数 β は ^3He の方が ^4He に比べて約2倍速度定数が大きいという結果となり、現在その考察を進めている。

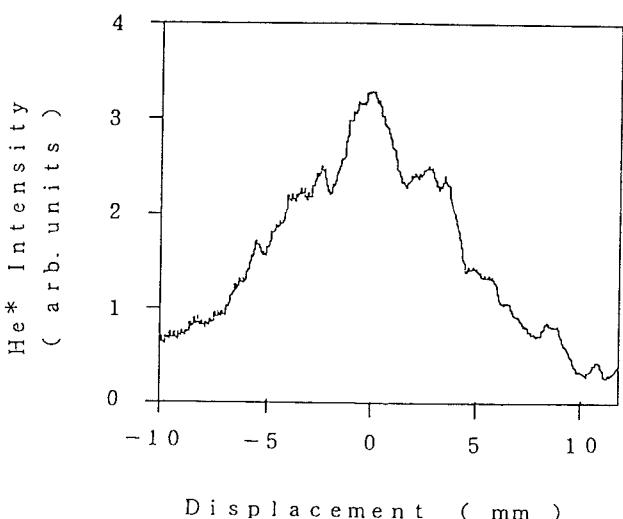


図7. He原子波の回折格子による回折像

5. おわりに

以上、我々のグループで進めているHe原子のレーザー冷却とその応用実験について簡単に紹介してきた。現在、応用的な実験も多少試みてはいるが、さらなる進展のためにはより高密度、より低温が必要であり、まだまだ装置的

にも大きな改造が必要だと思われる。これらの改良を早く済ませ、He原子をレーザー冷却している利点を大きく活用した実験を目指したい。

紙数の関係で一般的なことは省略したので、ぜひ参考文献を参照して戴きたい。

ここで紹介した研究はすべて分子構造学第一部門 森田紀夫助教授との共同研究です。長年に渡りなかなか進歩しない無知、不注意な筆者にご指導、叱咤激励いただき、こ

こに感謝致します。またこの実験は、機器の製作、技術相談では装置開発室に、また計測器などの使用、相談では機器センター、UVSORに、寒剤の利用、He回収系、冷却ノズルの設計では低温センターにと施設の方の大きなご支援、ご協力で実現したものです。ここに厚く感謝致します。

参考文献

- 1) J.Opt.Soc.Am. **B2**, 1706(1985), L.J.Opt.Soc.Am.**B9**, 2020(1989). これらはレーザー冷却の特集である。
総説としてはD.J.Wineland and W.M.Itano:Physics Today 6, 34 (1987), W.D.Phillips, P.L.Gould and P.D.Lett:Science 239, 87(1988), C.N.Cohen-Tannoudji and W.D.Phillips: Physics Today 10, 33(1990),
清水 富士夫 :応用物理 60, 864 (1991)
- 2) 特集がAppl.Phys. **B54**, 319 (1992)に掲載されている。
- 3) R.V.E.Lovelace, C.Mehanian, T.J.Tommila, and D.M.Lee:Nature 318, 30 (1985), V.V.Vladimirskii:
J.Exptl.Theoret.Phys.39, 1062(1960), E.A.Cornell, C.Monroe, and C.W.Wieman:Phys.Rev.Lett.67, 2439 (1991)
- 4) T.Hansch and A.Schawlow: Opt..Commun. 13, 68 (1975)
- 5) V.I.Balykin, V.S.Letokov, and V.I.Mushin : Sov.Phys. JETP 51, 692 (1980)
- 6) S.Chu, L.Hollberg, J.E.Bjorkholm, A.Cable, and A.Ashkin :Phys.Rev.Lett. 55, 48 (1985)
- 7) M.H.Anderson, J.R.Ensher, M.R.Matthews, C.E.Wieman, and E.A.Cornell: Sience 269, 198 (1995)
- 8) M.Kumakura and N.Morita: Jpn.J.Appl.Phys. 31, L276(1992)
- 9) L.D.Schearer, M. Leduc, D.Vivien, A.M.Lejs, and J.Thery: IEEE J. Quantum Electron. QE-22, 713(1986)
- 10) W.D.Phillips and H.Metcalf: Phys.Rev.Lett. 48, 596 (1982)
- 11) F.Shimizu, K.Shimizu, and H.Takuma : Opt.Lett. 16, 339 (1991)
- 12) C.L.Bohler and B.I.Marton: Opt.Lett. 19, 1346 (1994)
- 13) 大津元一、中川賢一：応用物理 58, 1428 (1989)

UVSOR ビームライン BL3B における 2 次元光電子分光

極端紫外光科学研究系技術係 服部秀男

1、はじめに

反応動力学研究部門(見附グループ)では、主に UVSOR の 2 本のビームライン BL2B2 と BL3B を使って、極端紫外領域の分子やクラスターの光励起ダイナミクスを研究している。ここでは、私が担当している BL3B で、現在行われている 2 次元光電子分光法(見附孝一郎助教授、彦坂泰正氏(東工大)との共同研究)について報告する。

2、超励起状態とは？

分子が、イオン化ボテンシャル(IP)以上のエネルギーをもった光を吸収すると、電子を放出し、イオン化する。(直接イオン化) このとき、過剰のエネルギーは、放出された電子の運動エネルギーとなる。

これに対して、エネルギーが IP 以上であっても、その分子固有の励起エネルギーの光を吸収すると、イオン化するのに十分な内部エネルギーをもった中性の励起状態に遷移する。これを超励起状態という。超励起状態が存在するエネルギー領域では、その周辺の領域に比べて、光吸収断面積が著しく変化する。一般に、極端紫外領域には、多くの超励起状態が存在するために、分子の吸収スペクトルは、非常に複雑なものとなる。

超励起状態にある分子は、非常に短い時間のうちに(約 10^{-13} 秒以内)に、電子を放出(自動イオン化)、中性のフラグメントに解離(中性解離)、正イオンと負イオンに解

離(イオン対生成)といった過程を通して、脱励起する。(図 1) このように、いくつかの脱励起過程が競争して起こるという点は、超励起状態に際だった特徴である。

このような性質をもった超励起状態を詳細に研究するためには、どのようなエネルギーにどのような超励起状態が存在し、また、この状態がどのような化学種のどのような状態に脱励起していくのかを知る必要がある。

超励起状態を観測するための光源として、広いエネルギー領域の極端紫外光が安定に得られる、シンクロトロン放射を利用することが非常に有効である。一方、超励起状態を観測する手段としては、古くから光吸収法、光イオン化質量分析法、蛍光励起スペクトル法などが用いられているが、超励起状態の脱励起過程を調べるという観点では、十分な情報を与えるとは言えない。そこで超励起状態の脱励起過程のうち、かなりの割合を占める自動イオン化過程に着目し、BL3B に光電子分光装置を製作した。次に、この手法の利点について述べる。

3、シンクロトロン放射を使った光電子分光法

分子にエネルギーの大きな光を照射し、イオン化によって放出される電子のエネルギーを測定する光電子分光法は、1960 年頃から希ガスなどの共鳴線を使って盛んに行われ、分子やイオンの電子構造、分子構造の研究に大きな成果があげられてきた。しかし、共鳴線を光源として用い

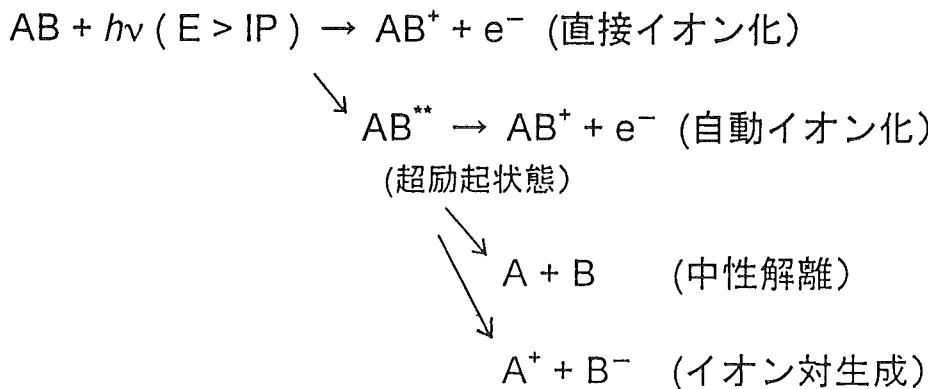


図 1 分子の極端紫外光領域での光励起過程

る方法は、励起エネルギーを変化させることができないために、分子の超励起状態を調べる手段としては、不十分なものであった。

一方、シンクロトロン放射を分光し、エネルギー可変の励起光源とすると、分子を特定の超励起状態に遷移させることができる。図2(a)に酸素を He(I) 共鳴線に対応する 21.2eV の光で励起したときの光電子スペクトルを示す。ピークはイオン(電子基底状態)の振動準位を示している。21.2eV には超励起状態が存在しないために、直接イオン化のみでイオンが生成し、スペクトルは分子基底状態とイオンのフランク・コンドン因子を反映したものとなる。一方、超励起状態への遷移が起こる 14.0eV での光電子スペクトルを図2(b)に示す。21.2eV の励起では見られなかったピークが横軸 13~14eV に現れている。これらのピークは、自動イオン化の寄与で生成したものである。このことは、図3のポテンシャルエネルギーによつて説明される。すなわち酸素が 14.0eV の光で励起され、平衡核間距離のより大きな超励起状態(O_2^{**})に励起する。核間距離が広がったときに自動イオン化するために、生成したイオン(O_2^+)の振動励起が引き起こされ、ピークが現れる。

このように、分子を超励起状態に遷移させ、自動イオン化で放出される電子のエネルギーを調べることによって、生成したイオンの状態に関する情報とともに、その超励起状態の性質(ポテンシャルの形状、寿命、対称性など)についての情報が得られる。

極端紫外領域には、多数の超励起状態が、ときには重

なって存在するので、幅広いエネルギー範囲で光を少しづつ掃引し、光電子スペクトルを測定する、すなわち 2 次元光電子分光を行うことは、超励起状態の性質や脱励起の際のダイナミクスの研究のための非常に強力な手段となる。

4. 光電子分光装置

シンクロトロン放射を励起光源とする場合、共鳴線に比べ光が弱く、またマシンタイムが限られるために長時間の積算ができるないという難点がある。さらに 2 次元測定をするためには、励起エネルギー 1 点あたりの光電子スペクトルをできるだけ高速に測定しなければならない。したがつて、電子の検出効率をできるだけ向上させたいという要求が生じる。本装置を開発するにあたり、次のような対策をとった。

1. 二重収束型のエネルギー分析器(160° 同心球型)を採用して、電子の取り込み立体角を大きくした。
2. 位置敏感型検出器を導入した。
3. 製作当初ジェットで試料を導入していたが、イオン化領域での試料圧を高めるためにガスセルに変えた。

光電子分光にじみの薄い方のために、2.について具体的に述べると、エネルギー分析器でエネルギー選別された電子は、運動エネルギーが大きい(速い)ものほど、電場で曲げられにくく、同心球の 2 つの電極間のより外側の軌道を通過する。通常の検出器(マイクロチャンネルプレートやチャンネルトロン)を使う場合は、分解能を上げるために、出射スリットを設けて、電極の間の中心部の電子の

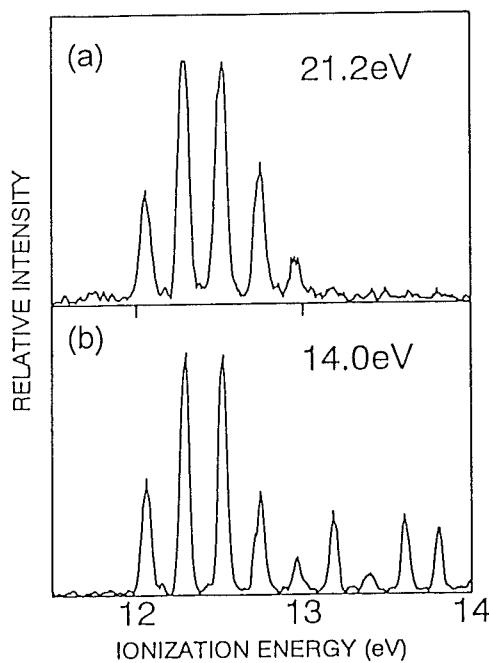


図2 酸素の光電子スペクトル ($O_2^+(X)$)

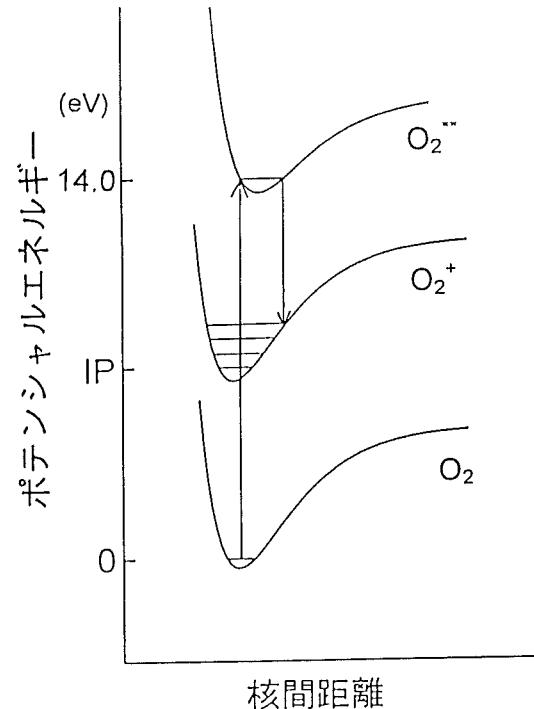


図3 自動イオン化の概念図

みを検出している。そこで、出射スリットを外し、位置情報を取り込める検出器を使い、そこに電子を収束させれば、分析器のある電極電位に設定したときに、数百 meV のエネルギー幅の電子のエネルギーを同時に知ることができ、単位時間当たりの電子検出効率が向上することになる。位置敏感型検出器に電子が当たったときの素子上の位置によって、検出感度にはばらつきが生じるが、分析器の電極電位を掃引し、各運動エネルギー値の電子が素子上のすべての位置を通過し検出されるようにして、この問題を解消している。

BL3B に組み込まれた観測装置を図 4 に示す。分光された放射光(PB) (波長領域 40~120nm)は下方から入射する。イオン化領域(PR)で試料がイオン化され電子が放出される。これを電子軌道半径 54.7mm の 160° 同心球型エネルギー分析器(EEA)でエネルギー分析をしたのち位置敏感型検出器(ED)で検出する。電子エネルギー分析器の最高分解能は、28meV である。一方、光イオン化効率曲線を測定するために 500mm の飛行管(DT)が備えられている。分光器、エネルギー分析器の制御、光やイオンの強度の測定など主な部分を CAMAC(PC9801 使用)で、また、位置敏感型検出器のデータを IBM 互換コンピュータで処理している。

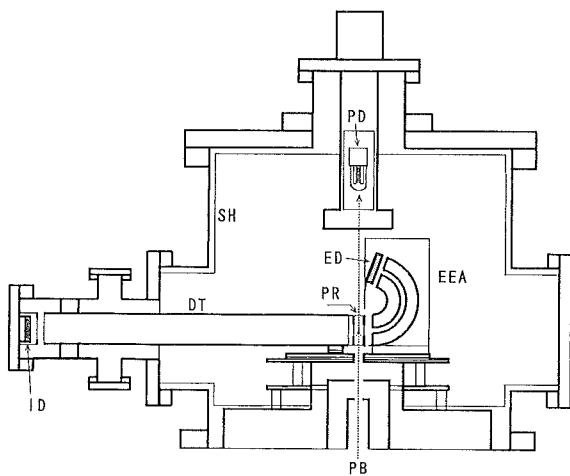


図 4 BL3B 光電子分光装置

5、実際の測定例

これまでにいくつかの分子のスペクトルを測定したが、ここでは、私が 2 年ほど前から取り組んでいるアセチレンのスペクトル(図 5)について述べる。詳しい議論は、参考文献(K.Mitsuke and H.Hattori, J.Chem.Phys.102,5288 (1995); H.Hattori and K.Mitsuke, J.Electron Spectrosc. Relat. Phenom.,in press.)に譲り、2 次元スペクトルの見方を述べるにとどめる。

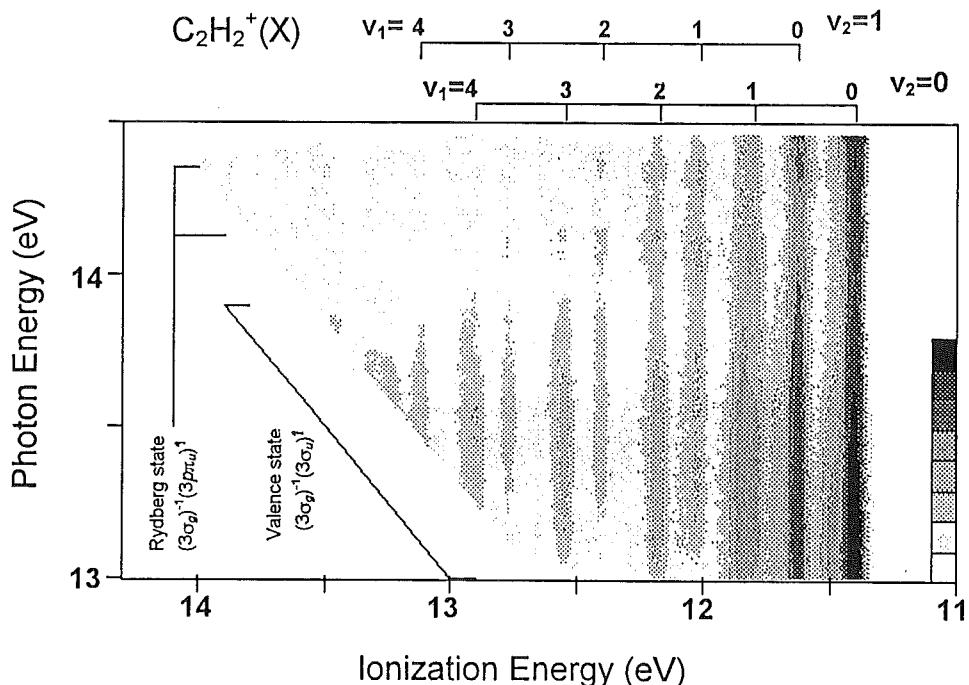


図 5 アセチレンの 2 次元光電子スペクトル

スペクトルの縦軸は、励起エネルギーすなわち分光器によって得られた光のエネルギー、横軸は、検出された電子のイオン化エネルギー(励起エネルギーと電子の運動エネルギーとの差)である。一方、電子の強度は、対数スケールで8段階の濃淡で表されている。ある励起エネルギーに着目して、水平方向にスペクトルを眺めたとき、濃淡(電子強度)はその励起エネルギーで測定された光電子スペクトルを表す。

際だった何本もの縦縞は、アセチレンイオン(電子基底状態)の振動準位に対応する。準位の帰属は、スペクトルの上部に示され、この図からC-H対称伸縮振動(V_1)とC-C対称伸縮振動(V_2)が励起していることが分かる。ある縦縞(振動準位)に注目し、縦方向に電子強度を眺めたとき、強度分布はその振動準位の励起波長依存性、いわゆるCIS(Constant-Ionic-State)スペクトルを意味する。

励起エネルギー14.1eVと14.3eVでは高い振動準位まで励起している事が分かる。励起エネルギー13.0～14.0eVにもプロットの濃い領域が広がっている。これらの領域で、電子強度が強くなるのは、図中左方に示したような超励起状態が存在していることが原因である。しかし、

14.1、14.3 eVと13.0～14.0 eVでは、明らかに濃淡のパターン(振動分布)が異なっており、このことは、2つの超励起状態の性質が異なることを意味している。アセチレンの場合には、現れていないが、超励起状態の分子が解離して、超励起した原子が生成し、これが自動イオン化して電子を放出する場合や、分子が解離しながら自動イオン化する場合には、2次元スペクトル上に独特的のパターンを示す。以上のように、2次元光電子分光を行なうことにより、超励起状態の性質や脱励起の際のダイナミクスを詳細に調べることが可能となる。

6、最後に

極端紫外領域の分光は、古くは1960年代から行われているが、どのような超励起状態がどのように脱励起するかという情報の蓄積は、まだ不完全である。特に多原子分子の超励起状態のダイナミクスを調べることは、分子科学として非常に重要であるにもかかわらず、未開拓の領域と言える。今後の計画として、2次元光電子分光を様々な多原子分子の超励起状態の研究に応用していくことを考えている。

有機（超）伝導体の核磁気共鳴

分子集団研究系技術係 宮川和也

1. はじめに

核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance : NMR) は、その現象が観測されてから 50 年ほどしかたっていません。しかし、その応用は実に広範囲にわたり、物理、化学のみならず、医学の分野まで進出しています。ここでは、NMR を物性物理の研究手段として利用した話をします。

なお、ここで紹介するデータは高分解能 NMR で用いられているスピニングはおこなっていません(それは、物性研究では磁場の値も変化させて NMR を行うことがあること、低温(5K)になるとスピニングができなくなるためです)。

2. 核磁気共鳴について

核磁気共鳴は原子核を通じて、物質中の電子がつくる内部磁場を動的、静的に調べる手段です。

人にも、名前、性別、所属、住所などその人を特徴づけるものがありますが、原子核にも核スピン (I) とよばれるものがあります。NMR 信号が観測されるには、核スピンがゼロ以外でなくてはなりません。ここでは簡単のために $I = 1/2$ とします。この核スピンがもつエネル

ギーは、零磁場中にあるときには、すべて同じのですが、磁場中にいれると、2つのエネルギー状態にわかかれます(エネルギーの高い方を A、低い方を B とします(図 1))。

それぞれのエネルギー状態にある核スピンの数は、熱平衡にあるときは、同じではなく低い方が多くなっています(この分布の仕方は Boltzmann 分布とよばれています)。

A と B のエネルギー差に等しい高周波磁場を入れますと、エネルギーの吸収がおこり、NMR 信号が発生します。この時共鳴条件は、共鳴周波数を ω 、原子核が感じている磁場を H とすると、 $\omega = \gamma H$ と書けます。

γ は核磁気回転比とよばれ、これも原子核を特徴づけるもののひとつで、核種ごとに固有の値をもっていますので、物質中に NMR 可能な核種を複数含んでいればそれぞれの核種について選択的に NMR をおこなうことができます。

さて、物質中の NMR に目を向けてみましょう。磁石を用いて外から印加している磁場を H_o 、電子がつくる磁場を H_e とすると、 H_e は時間とともに変化するので、

$$H(t) = H_o + H_e(t)$$
$$= H_o + \langle H_e \rangle + \delta H_e(t)$$

と書けます。

$\langle H_e \rangle$ は、 H_e の時間平均、 δH_e は H_e の揺らぎの部分を表しています。

ここで NMR 測定でスペクトル以外に測定される 2 の物理量、Knight shift と、スピン格子緩和時間 T_1 について簡単にふれておきたいと思います。

Knight shift (K) : 外場 H_0 の時に、期待される共鳴周波数は $\omega_0 = \gamma H_0$ ですが、実際には $\langle H_e \rangle$ だけの磁場がさらにありますので、 ω_0 から $\Delta\omega = \gamma \langle H_e \rangle$ だけずれた(shift した)ところに共鳴線が観測されます。

この、電子スピンがつくる磁場によって共鳴周波数が shift することを、発見者にちなんで Knight shift とよび、 $\Delta\omega / \omega_0$ (高周波にずれる方を正としま

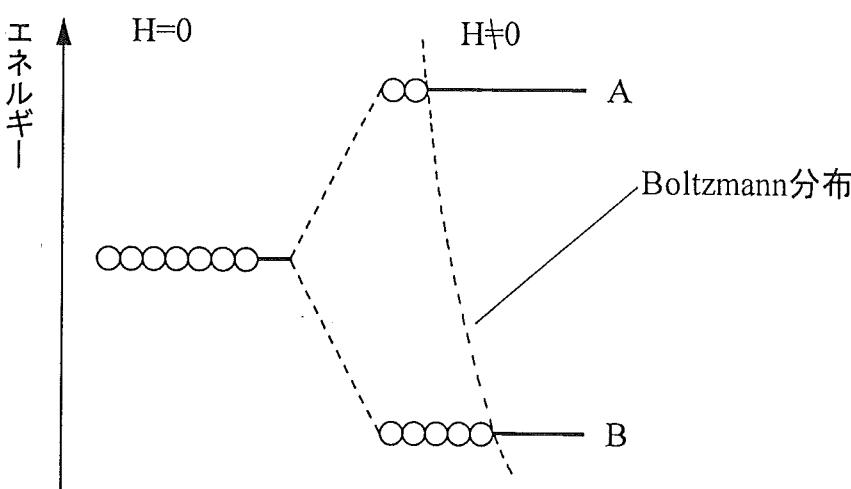


図 1

す)で定義されます。

T_1 : 热平衡状態にあった核スピン系が共鳴をおこすと、その分布も当然影響をうけます。高周波磁場を切ると、影響を受けた状態から、エネルギーを電子系に渡して、热平衡状態に戻りますが、その戻るまでの目安の時間を T_1 とよびます。エネルギーの受け渡し先である電子系の状況が変化すれば T_1 も影響を受けることになり、そこから、電子系の情報が得られるわけです。上の式でいえば、 $\delta H_e(t)$ の大きさ、時間変化(揺らぎ)の速さで、スピン・格子緩和時間 T_1 が決まります。電子の間の相互作用を無視すると、 $1/T_1$ は温度(T)に比例し、さらに詳しい計算から $1/(TTK^2) = \text{定数}$ となることが示されています(Korringaの法則)。

3. 有機伝導体の NMR

今回は一例として $\kappa-(BEDT-TTF)_2X$ ($X = Cu(NCS)_2$ 、 $Cu[N(CN)_2]Br$ 、 $Cu[N(CN)_2]Cl$) という物質の NMR 測定の結果を示します。 κ は BEDT-TTF 分子の配列の仕方を示しており、BEDT-TTF 分子は図 2 に示すような構造をした分子です。

$X = Cu(NCS)_2$ 、 $Cu[N(CN)_2]Br$ の塩は、ともに超伝導を示し、その転移温度は、 $Cu(NCS)_2$ で 10K、 $Cu[N(CN)_2]Br$ では、フラーレンを除くと常圧では有機

超伝導体最高の 12K になります。電気抵抗は、室温から温度を下げていくと、半導体的に大きくなっていますが、50~60K から、金属的になります。

それに対して、 $Cu[N(CN)_2]Cl$ では、金属的な温度依存性をみせず、半導体的なまま大きくなり、絶縁体となってしまいます。また、25K で弱い強磁性を示すことがしられています。ところが、この $Cu[N(CN)_2]Cl$ に圧力をかけていくと、金属的な温度依存性をみせ、さらに有機伝導体最高の転移温度 13K で超伝導になります(ここで

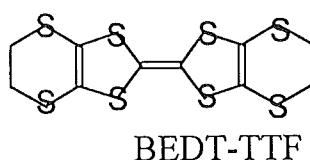


図 2

もフラーレンは除きます)。

これは、磁気的な絶縁体相と超伝導相が近いところにあると考えられ、物質の内部磁場を直接測定可能な NMR の出番となります。ここで、図 2 の BEDT-TTF 分子を見てみると、NMR が可能な原子核は外側の 1H しかありません。しかし、残念なことに、伝導電子(正確にはホールです)の密度がほとんどありません。

そこで、分子研の内外の様々な方々の協力をえて、電子密度の高い中心の ^{12}C を NMR 可能な核種 ^{13}C に置き換えました。図 3 に、常圧下での ^{13}C の NMR 測定からえられた、 $1/(TT)$ の温度依存性を示します。先ず、目につくのは、 $X = Cu[N(CN)_2]Cl$ 塩でのピークです。これは、磁気秩序の発生によるものです。 $X = Cu(NCS)_2$ 、 $Cu[N(CN)_2]Br$ 塩でも、 $1/(TT)$ は 60K 付近までは $X = Cu[N(CN)_2]Cl$ 塩と同じような温度依存性をしています。また、その絶対値も、前述した Korringa の法則から求めた値の数倍大きな値となっています。これは、電子間の相互作用を無視しては、この物質の電子状態を記述できないことを示しており、 $X = Cu[N(CN)_2]Cl$ 塩では強い電子相関のために絶縁体(Mott 絶縁体とよばれます)となり、常圧で超伝導となる $X = Cu(NCS)_2$ 、 $X = Cu[N(CN)_2]Br$ 塩でもその相関は残っており、その相関の発達が低温で押さえられて超伝導になっていると考えられます。

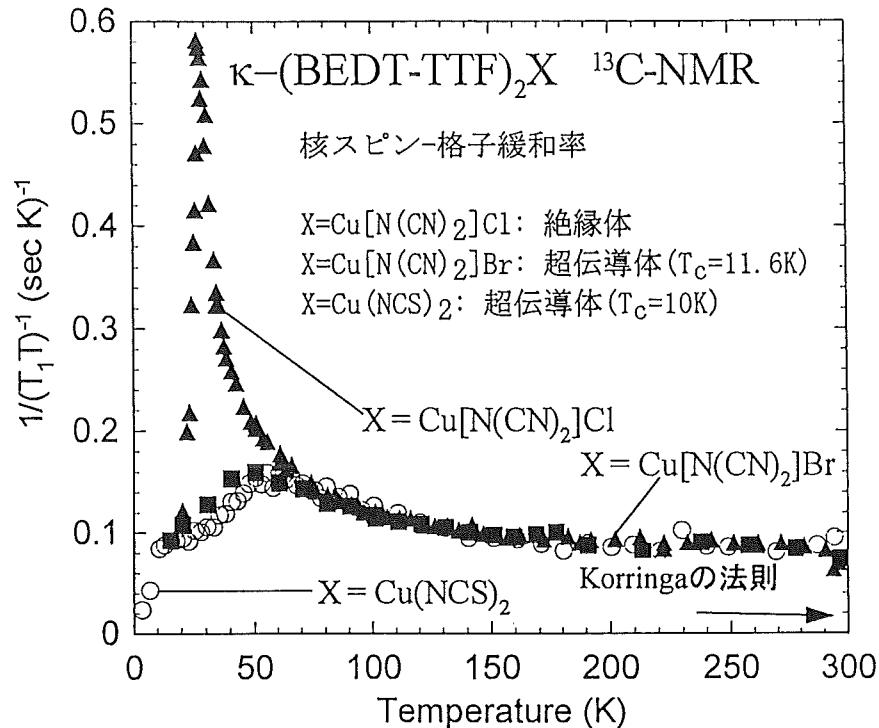


図 3

$X = Cu[N(CN)_2]Cl$ の低温での磁気構造を調べるために 1H -NMRを行いました。 ^{13}C では電子密度が大きすぎて、スペクトルが大きく広がってしまい磁気転移後の状態を調べるのが困難になるためです。その結果、この磁気転移は電子スピンが反平行に並ぶ反強磁性転移でそれが少し傾いたため(キャントしたため)に強磁性をとっていること(図4)、また大きなモーメントをもつていることがわかりました。

このようにNMRでは測定する核種を目的に応じて選ぶことによって、電子状態に関して多くの情報が得られます。

4. おわりに

NMRを物性測定に応用した例として、有機伝導体を取り上げてかいてみました。前節の最後のところにも書きましたが、NMRは測定する核種を選択することによって

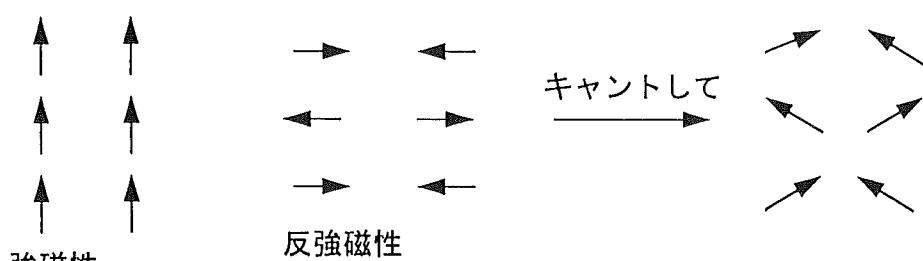


図4

電子状態に関する様々な侧面に関する情報がえられます。このことから、有力な物性測定の手段のひとつと考えられています。他の物性測定結果からの情報とあわせて、有機伝導体の電子状態についての理解をより進めていたらと思っています。

最後に、この研究は、実に多くの方々のお世話をなっていますこの場をかりて深く感謝いたします。

技術講座「知らなきや損する技術の常識」

—機械工作を10倍楽しくする—

はじめての機械工作入門（最終回）

装置開発技術係長 堀米利夫

このシリーズも最終回となりました。最近の実験装置はたいへん複雑でしかも特殊な材料が使われることが多いっています。このような装置の部品作りには、今まで述べてきた汎用工作機械では対処できない場合がでてきます。今回はこのような時に役に立つ工作機械について述べます。さらに、切削油剤と測定器について述べて、このシリーズを終わりたいと思います。

IV. いろいろな工作機械

1. NC工作機械

機械工作経験のない人でも一、二度ぐらい「NC工作機械」と言う言葉を聞いたことがあると思います。

NC工作機械は数値制御（Numerical Control）装置が付いた工作機械をいいます。数値制御装置は作業者が工作するときに必要な情報（例えば、加工する長さ、加工するときの速さ、主軸の回転数、切り込み量など）を予め記憶させて置き、作業者が行わなければならない操作を代わりに行ってくれる装置です、正確には数値制御装置付工作機械ですがを単にNC工作機械と呼ばれています。例えば、NC装置付き旋盤をNC旋盤、NC装置付きフライス盤をNCフライス盤と言います。図1にNCフライス盤の

例を示します。

NC工作機械は、a)最初の製品ができると後は何個でも作ることができる、b)作業者の経験が必要とされなくなった、c)自動運転ができる、などの点で工業界においては大量生産を可能にしました。最近は多くの大学・研究所の工作室にも設備されており、もはやNC工作機械は特別な工作機械ではなくなります。曲面形状を持つ部品の製作を汎用機で行う場合は、専用のジグを製作しないとできませんが、NC機では形状を数値化することによってジグなど製品以外のものを製作することなく部品が手に入ります。従来、汎用機で苦労して製作していた部品が簡単に出来てしまうようなケースもあります。たとえば、角形の輪郭を持つ形状に公差精度の高い穴明けが必要な部品で旋盤作業、フライス盤作業が混在するようなものを製作しようとする場合、汎用機では、a) フライス盤と旋盤の2台が必要、b) 機械が代わる度に工作物の取付をしなければならない、c) 必要によっては取付用のジグがそれぞれ必要になる、などの点がNC機だと一台の機械で行えるため、取付作業も一度で済み、取付工具なども少なく済みます。また、取付作業が少ないことは製品の精度を上げる結果となり、精度の高い部品が製作可能となります。

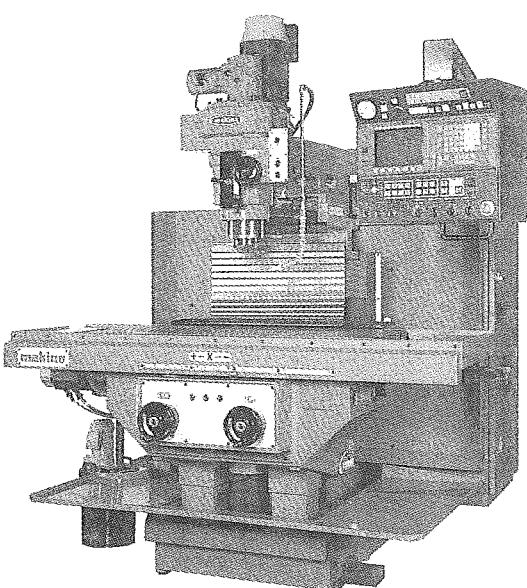


図1 NC フライス盤の例

NC装置に情報を送る手段として、当初のNC機はせん孔テープによって行われていましたが、最近はパソコンを始めとするコンピュータを使うのが一般的に成りつつあります。さらに、CADによって設計された装置部品の設計データをそのままNC工作機械に送って部品ができるシステムもあります。

初心者には一人で運転する事は出来ませんがスタッフの方の指導のもとにNC機による工作の体験する機会を得てください。今までの機械工作の範囲がより広がり、工作的面白さを見つけることが出来るかもしれません。

2. 切削工具を使わない工作機械

今まで説明してきた工作機械は硬い刃物（切削工具）で金属を削って加工するものでしたが、切削工具を使わないで放電、光、電子ビーム、超音波などを利用して加工する工作法があります。このような加工法は幾つかありますが、その中の放電加工と超音波加工について述べます。

1) 放電加工機

放電加工機は刃物の代わりに放電のエネルギーを使って加工する工作機械です。

放電加工は、a) 導電性材料のみで、プラスチックやセラミックなどは加工できない、b) 切削困難な硬い材料でも加工可能である、c) 微細加工や微小な部品の製作がしやすい、d) 加工時に電極と加工物が直接接触するがないため、切削加工のような加工歪みが少ない、e) 加工物のセッティング等が簡単に済むなどの利点があります。しかし、切削工具と比べて加工時間が多めにかかる傾向があります。図2に放電加工の加工例を示します。

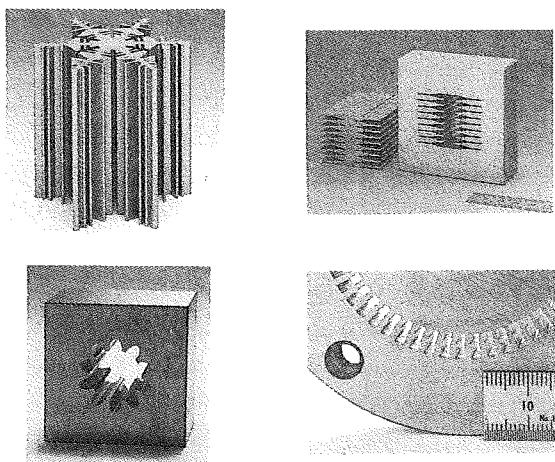


図2 放電加工例

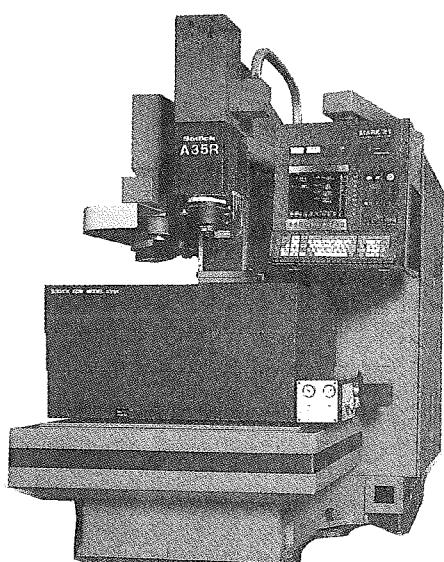


図3 型彫放電加工機の例

放電加工機は型彫放電加工機とワイヤー放電加工機の2つに大別できます。

型彫放電加工機は、製作する形状と同じ形状の電極を用いて投影加工する加工法です。

製作しようとする形状にあった電極を予め製作しておく必要があります。電極材料としては銅、銅タン、銀タン、グラファイトなどが利用されます。また、加工は油中で行われ、エネルギーの高いときは発火する危険もあるため、最近の放電加工機には消化器が機械の横に装備されているものもあります。図3に型彫放電加工機の例を示します。

ワイヤー放電加工機は電極にワイヤー(例えば、直径0.2 mmの真鍮線)を電極にして糸鋸式に2次元の輪郭加工する放電加工機です。一度使ったワイヤー電極は使い捨てです。なぜならば、ワイヤ一面に放電痕が残るため再利用することはできません。ワイヤー放電加工機は先に述べたNC技術の進歩と放電制御のエレクトロニクス技術の進歩によって発展した工作機械です。図4にワイヤー放電加工機の原理説明図を示します。

特定の電極は必要ありませんが、2次元的な形状しか製作できません。しかし、最近は放電加工機の技術的進歩によりテーパ状に加工するとか、2次元の上面形状と下面形状の違う製品が加工できるなど、形状が複雑なもののが加工が可能になりました。加工は水中或いはノズルによって放電部分に水を掛けて行いますので、型彫放電加工のように発火するような危険はありません。ワイヤー放電加工機については「かなえ NO.2」に装置開発室の加藤氏によって詳しく述べられていますので参考にされることをお勧めします。表1に型彫放電加工とワイヤー放電加工の加工比較表を示します。

2) 超音波加工機

超音波加工機は超音波の振動を刃物の代わりにして加

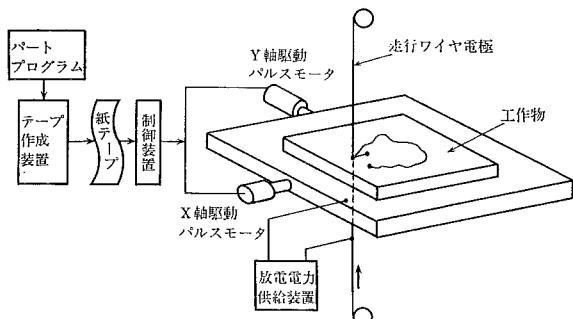


図4 ワイヤー放電加工機の原理図

	型彫放電加工	ワイヤ放電加工
電極製作	特定形状の電極必要	特定電極不要、テープ作成必要
加工精度	電極との現物合せ加工 (寸法が大きくとも嵌合精度、クリアランスは均一)	N CによるX-Y合成 (ボールネジとN Cの精度による精度表示は単位長さ当たりとなる)
	クリアランスは仕上面あらさできまり調節困難	クリアランスの調節は容易
	加工による材料の残留応力開放による変形少い(常に再加工)	残留応力開放による変形出やすい(セカンドカット必要)
加工速度	加工面積は広範囲にわたる	常に小面積加工のため、面積効果を受けやすい加工範囲
変質層	浸炭による硬化層厚さ、仕上面あらさに対応	軟化層(電極材銅の固溶)厚さ、仕上面あらさに対応
安全	油中放電加工のため、安全装置があっても、使用上の不注意による発火の可能性あり。要着視	水中加工のため、発火することなく、完全無人運転可能
初期コスト	1	1.5

表1 型彫放電加工機とワイヤー放電加工機

加工比較表

工する工作機械です。16~30kHzの高周波電力を振動子に供給し、超音波振動を発生させます。発生した超音波振動は振動子に結合されたホーンによって拡大され、先端の工具を振動させます。その時、砥粒を含ませた加工液を同時に流しながら加工物に押し当て加工します。振動している先端の工具が砥粒を振動させ、砥粒が加工物を破碎しながら加工を進めています。先端の工具は加工物の加工形状にしておく必要があり、前述の型彫放電加工に似ています。図5に超音波加工機の加工原理説明図を示します。

加工時はホーン先端の工具も工作物と同じようにダメージを受けますから工具は消耗品となります。工具材料には耐摩耗性の点からステンレス鋼が望ましいが、製作の容易さから鋼材(SS材、SK材)が多く使われます。

加工精度は砥粒の粒径、加工物とのクリアランスなどの加工条件をうまく選定してやることにより精度の高い加工ができます。実際には条件出しは簡単ではなく、加工精度・効率を高めることはたいへんですが、ガラス、石英、シリコン、アルミナ、サファイア、ルビー、超硬合金、炭化ケイ素、ダイヤモンドなどの脆性材料、焼結材料への加工ができる点が他の加工機にない特色です。図6に超音波加工の加工種類、図7にホーンの実用例、図8に超音波加工機の例をそれぞれ示します。

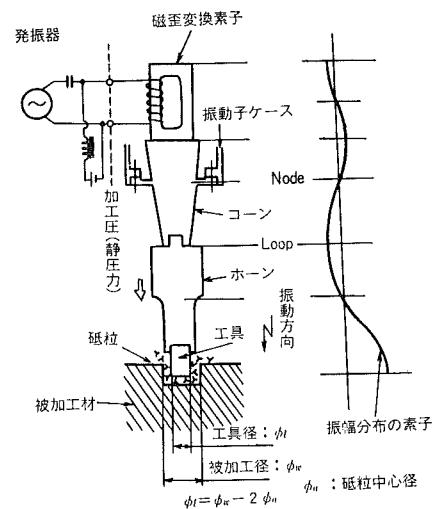


図5 超音波加工機の加工原理図

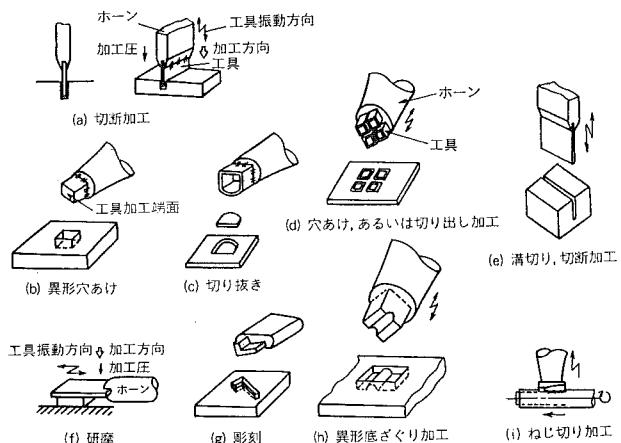


図6 超音波加工の種類

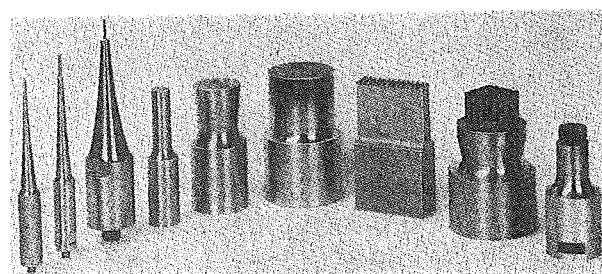


図7 超音波加工機用ホーンの実用例

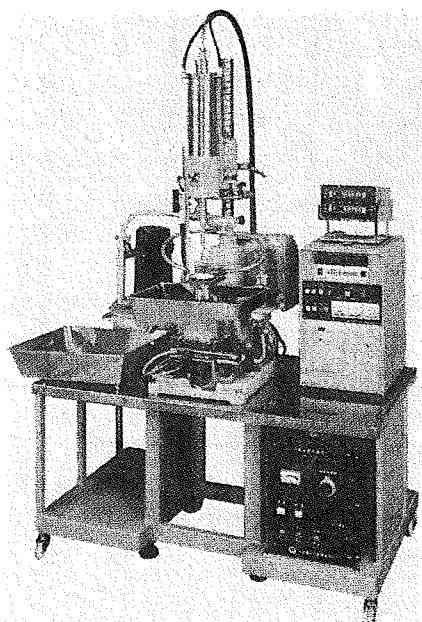


図 8 超音波加工機の例

最近は、セラミックなどの部品が実験室の装置に使われるが多くなり、ちょっとした穴加工などが必要になることがあります。そのような時に精度等を問題にしなければ自分で手軽に加工が行える工作機械です。

V. その他

1. 切削油剤

切削加工を行うときには切削油剤が使われます。切削油は工具と工作物との潤滑作用と切削によって発生した熱を取り去る冷却作用によって切削工具の磨耗を防ぎ、寿命を延ばす効果があります。

使用される切削油剤は水溶性切削剤と不水溶性切削剤(油剤)に分けられます。水溶性切削剤は不水溶性切削剤に比べて冷却の能力が高いため、冷却能力を必要とする場合に、一方、不水溶性切削剤は潤滑作用が高いため、潤滑能力を必要とする場合に使われています。工作室(センタ)で使われている一般的な切削剤は不水溶性が多いです。

超硬工具による高速切削、重切削では切削剤によってクラックを発生するような場合もあるので注意が必要です。ステンレス鋼、銅、アルミニウムなどの材料の加工においては切削剤を使用しますが、真鍮材の加工においては使用する必要はありません。切削剤によって切削工具の切れ味に違いがありますから加工材料によって切削剤の使い分けをしながら使うことが必要になります。

備え付けの油ポンプで給油をしても良いですが回りが汚れたりしますから、ハケやふでなどを使って、切削箇

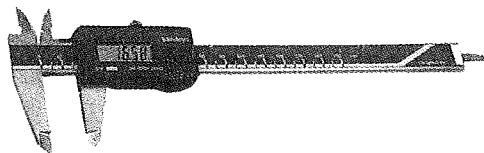


図 9 デジタルノギスの例

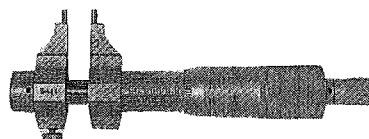


図 10 キャリバ型マイクロメータの例

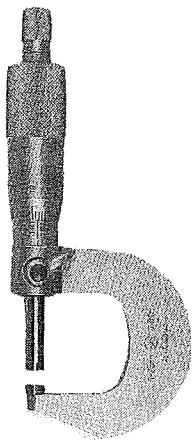


図 11 外測用マイクロメータの例

所につけてやるだけでも効果ができます。切削剤を使用すると切削熱により白煙やにおいが発生する事があるので換気装置などを運転させながら工作をすることを忘れないようにしましょう。

2. 測定器

機械工作には加工するための工具・機械が必要ですが自分が必要とするものを作るためには、寸法を測定しながら加工しなければなりません、そのため色々な測定器が工作をするうえで必要となります。たくさんの種類の測定器がありますが一般的なものについて紹介します。

a. ノギス 機械工作をする現場で最も使われている測定器です。スケールとバスを一体化したものです。これ一本で、ものの外径、内径や深さなどが測れる有用な測定器です。読み取り精度は 0.02 mm と 0.05 mm の 2 種類あり、測定長は 1000 mm 位が最大です。中にはそれ以上の特別なものが使われているところもあります。工作経験の浅い人も測定長 150 mm 程度の自分のノギスを持つことをお勧めいたします。最近はデジタル型ノギスも市販されています。図 9 にデジタル型ノギスの例を示します。

b. マイクロメータ ノギスの精度よりも高く 0.01 mm (または 0.001 mm) まで測定できます。一般的には 1 本の測定長は 25 mm 単位になっています。大きいものから小さいもの

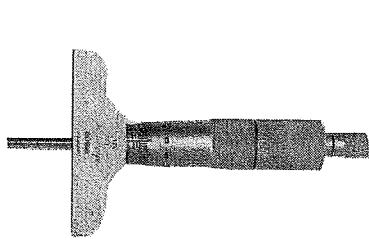


図 12 深測用マイクロメータの例

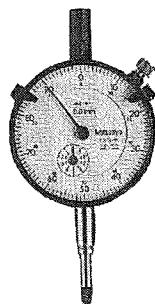


図 13 ダイヤルゲージの例

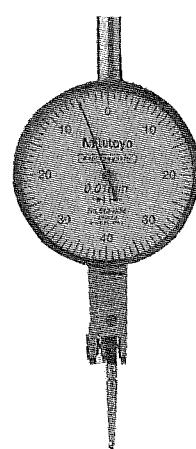


図 14 てこ式ダイヤルゲージの例

までを測定しようとすると数本のマイクロメータが必要になります。また、測定箇所によっても内測用、外測用、深測用などに分類されます。図 10 にキャリバ型内測マイクロメータの例、図 11 に外測用マイクロメータの例、図 12 に深測用マイクロメータの例をそれぞれ示します。

c. ダイヤルゲージ この測定器は測定子の動きを拡大機構で拡大して、それを指針の動きに表した比較測定器です。比較測定器はノギスのように、直接、測定値が読みとれるものと違い、何か別の基準のものと比較して、その変位量、差を読みとるものです。現場の測定には、数値を直接読みとるよりも、平行をみたり、心出しを行うような時に使う

と便利な測定器です。ダイヤルゲージはスタンドと一緒に使われます。1 目盛精度は 0.01 mm が一般的ですが 0.02 mm、0.001 mm 目盛のものもあります測定範囲は 0.01 mm 目盛用で 0 ~ 10 mm です。

図 13 にダイヤルゲージ、図 14 にてこ式ダイヤルゲージの例をそれぞれ示します。

d. ハイトゲージ 高さを測るとともにけがき作業を行う時に使用します。通常は工作室の定盤の上に置いてあります。けがき作業を行う時は必要な寸法を目盛に合わせて、先端に取り付けられたスクレイバによって金属面に直線をけがきます。読み取り精度はノギスと同じです。図 15 にハイトゲージの例を示します。

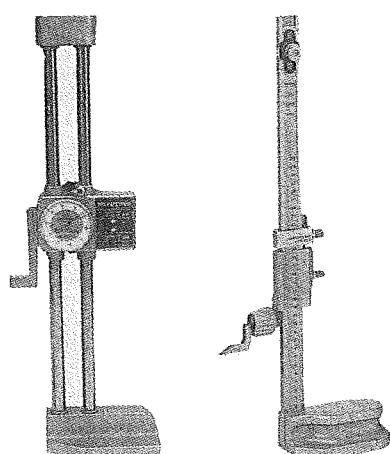


図 15 ハイトゲージの例

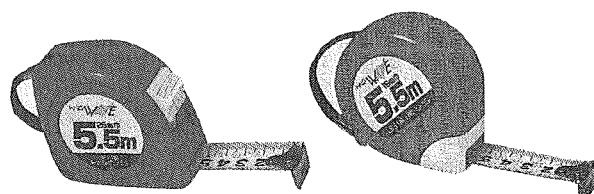


図 16 直尺とコンベックスの例

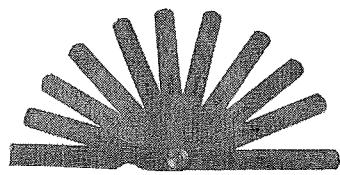


図 17 スキマゲージの例

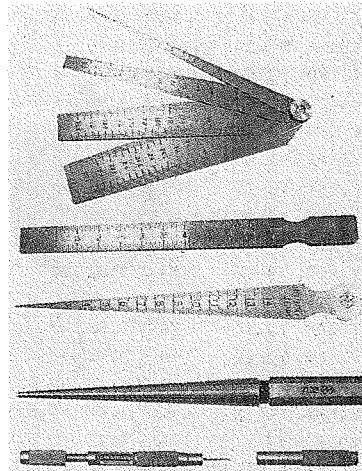


図 18 テーパゲージの例

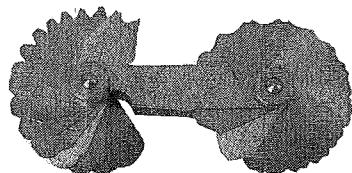


図 19 ラジアスゲージの例



図 20 センターゲージの例

e. その他 直尺(金属スケール)、曲尺(コンベックス)

ス)などはよく使われる測定具です。

図 16 に直尺とコンベックスの例を示します。

f. 各種ゲージ類 工作をするときに必要になるもので
ゲージと呼ばれているものが幾つかあります、その主なものをあげておきます。

・スキマゲージ

(狭いすきま量を測定します)図 17 参照

・テーパゲージ

(テーパ穴の大きさを測定します)図 18 参照

・ラジアスゲージ

(面の丸みを測定します。)図 19 参照

・センターゲージ

(バイトでねじ切り作業をするときに使いま
す)図 20 参照

測定器は工作を行うときにたいへん重要なものの一つです。これらの測定器は簡単そうにみえてもより正確に、より効率的に使いこなすには、それなりの「こつ」があります。個人専用のノギスでしたらぶつけで壊しても自分が不便な思いをする程度で済みますがマイクロメータ、ダイヤルゲージなどは全員で共用して使ってますので、壊してしまうと回りの人にもたいへん迷惑がかかるようなことがありますから、使うときには十分注意を払って正しい使い方をすることが大切なことです。これは測定器に限らず工作をするうえで全てに言えることです。工作がうまくなる秘訣(No.6) “工作機械・測定器・工具を大切にすることです”

2. おわりに

工作機械の経験が少ない人を対象に初歩的なことを中心に述べてきました。工作機械はこれだけのことが理解できればいい工作ができると言うことはなく、日頃の経験の積み重ねによって、自分の欲しいものを手に入れることができるようになります。時間的に余裕ができたときに、このシリーズを読み返してください、このシリーズは写真や図を多くして、工作機械・工具などの名前と実際の形が一緒に覚えられるように配慮しました。どうぞ、工作室に気軽に数多く足を運んで、多くの経験をして、“ものづくり”的な楽しさを味わいましょう。

これで終わります。

参考文献(文中の図、表などを引用させていただきました。)

放電加工機のしくみと 100 % 活用法	技術評論社
マイクロ応用加工	共立出版
測定のテクニシャン	大河出版
超音波加工の応用	日本電子工業(奥山、塚野著)
放電加工機販売カタログ	ソディック
工具販売カタログ	

マイレビュー

光合成の初期過程の研究について

電子構造研究系技術係 熊崎茂一

岐阜県のような田舎に生まれ育ったせいか、私は、住んでいる場所の近くに森林や山が見えていると何となく安心します。緑色という色もわりと好きです。こういう感覚が全く個人的なものなのか、あるいは、人類、いやもつと広く動物に本来備わったものなのか、本当のところどうなんでしょう？まあ、他人や動物の感受性はともかく、わたしのそういう好みと関係するのか、いや、やはり大学生時代に化学の授業に出席していなかったせいで分子一個

一個についてあまり深く考えないせいか、私の最近4年間ほどの研究の内容は、光合成光化学系反応中心色素-タンパク質複合体における光誘起初期過程の研究とでもいうべきものになっています。

植物の葉緑体の内部では、脂質とタンパク質から成るチラコイド膜という膜が何重にも折り込まれた構造をつくっています。チラコイド膜に埋め込まれたタンパク質には、何種類があります。そのうちの光化学系I複合体では、二

Redox potential
(volts)

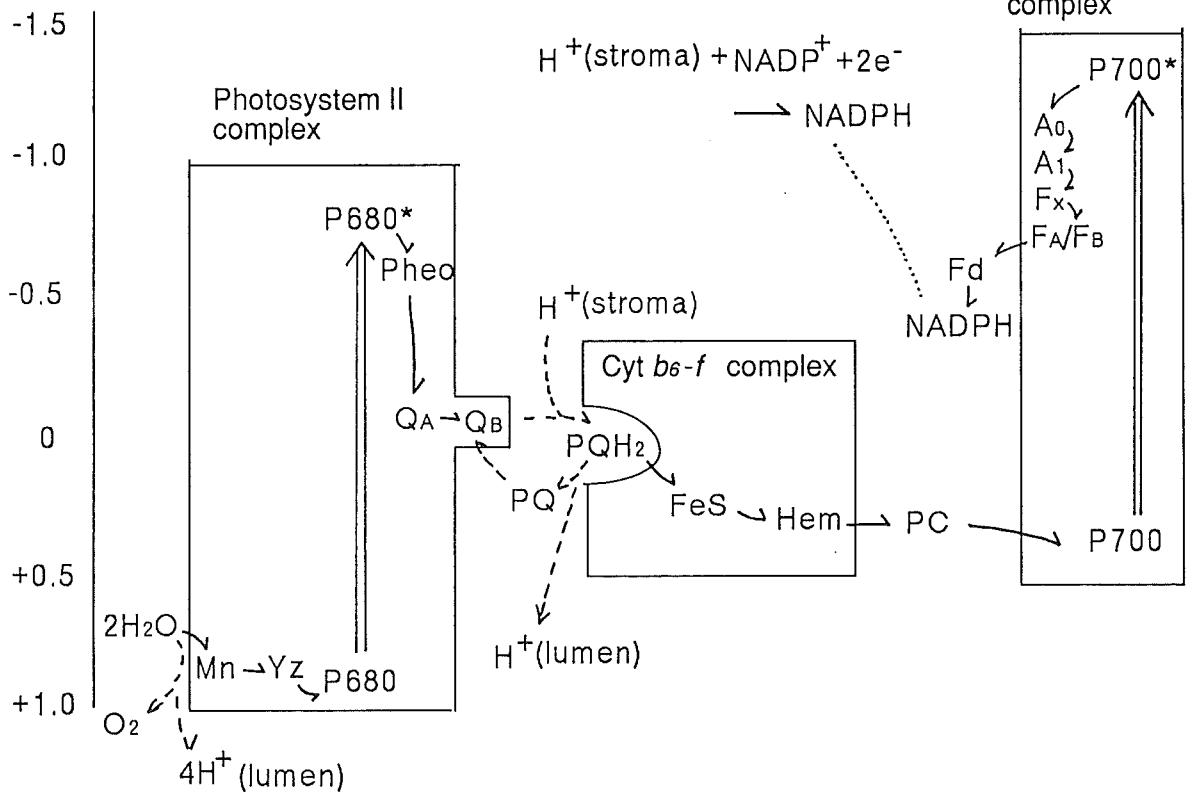


図1 植物のチラコイド膜上の光化学系I複合体(Photosystem I)、光化学系II複合体(Photosystem II)およびチトクローム複合体。電子キャリアーの酸化還元電位を縦軸にして表示。三つの複合体は協同して光合成を行う。二重矢印は、光による直接励起やエネルギー移動によってP700やP680というクロロフィル(二量体かもしれない)が電子励起されることを示す。一重矢印は電子移動を示す。破線矢印はプロトンや分子の移動。電子移動に伴って、プロトンがストロマ側からルーメン側へ運ばれる。図上側がストロマ側、下側がルーメン側。

酸化炭素から炭化水素をつくりだすための還元力を作り出しますし、光化学系2複合体では、水から酸素をつくりだすための酸化力を作り出します（図1参照）。水と二酸化炭素という比較的安定なものから炭化水素と酸素という高い化学エネルギーを持ったものをつくるわけで、そこには太陽から供給される光のエネルギーが巧みに利用されています。光の吸収のためには、おもにクロロフィルという色素分子が使われています。地球に到達する太陽光のエネルギースペクトルは可視光領域（およそ400から750nm）、特に500 nm付近に極大を示します。そして植物中のクロロフィル分子は400から500 nm付近と600から700 nm付近に強い吸収を示します。これはうまく一致しているというべきでしょう。植物が進化の過程で他ならぬクロロフィル

を光エネルギー吸収のために選択したのだと解釈できます。光エネルギーを吸収して、光化学系1や光化学系2に電子励起エネルギーを伝達することに特化したクロロフィルタンパク質複合体（光捕集系）もチラコイド膜上に存在します。

光化学系1複合体や光化学系2複合体では、クロロフィル分子がタンパク質中に配列されていて（水素結合や配位によりタンパク質中で配置されている）、光を吸収したり光捕集系から励起エネルギーを受け取ったりして電子状態が励起状態（一重項）になります。クロロフィル分子が溶液中にとけている場合、その電子励起状態は数ナノ秒の寿命でなくなります。蛍光や分子運動のエネルギーとして散逸されてしまうわけです。ところが光化学系1複合体や

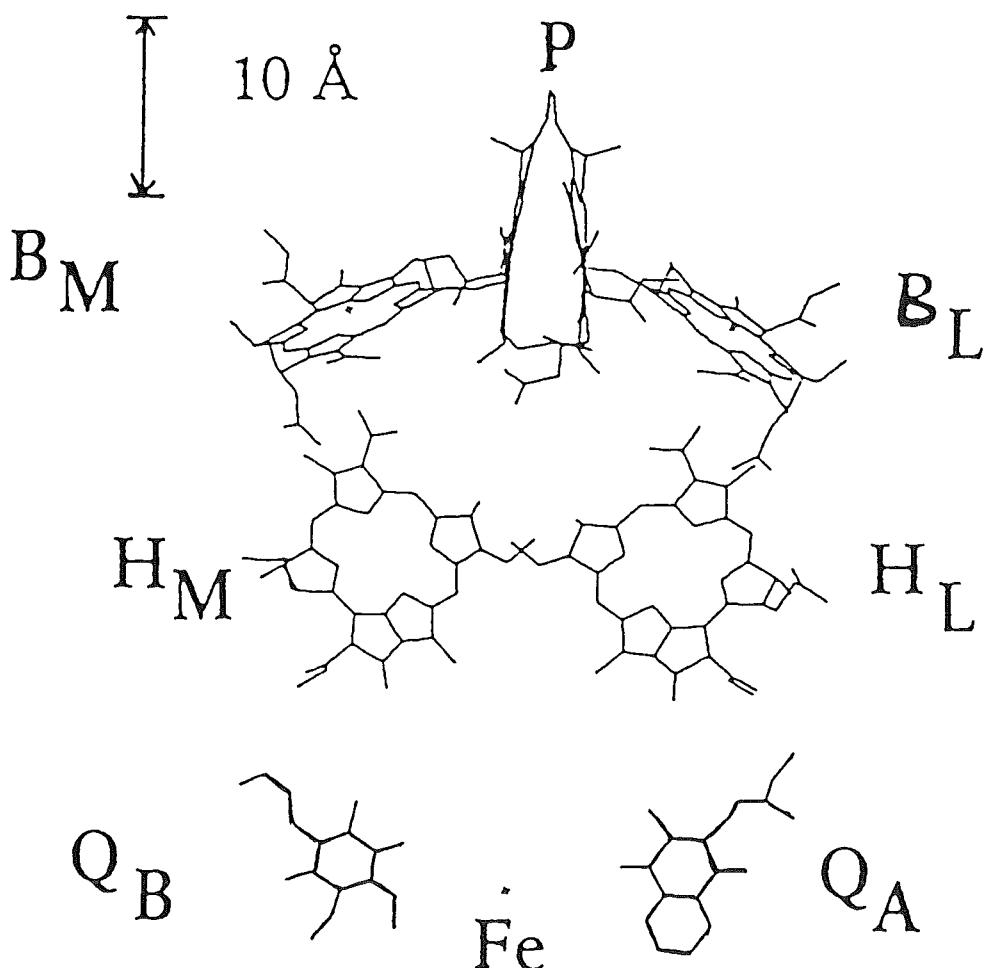


図2 紅色光合成細菌 (*Rps. viridis*) の反応中心色素タンパク複合体中の電子移動に関わる分子の配列。ただしタンパク質を除いて示している。電子はP（バクテリオクロロフィル二量体）の励起状態から、約3ピコ秒でHL（バクテリオフェオフィチン）に、約200ピコ秒でQA（キノン）に、そして約100マイクロ秒でQB（キノン）に到達する。PとFeを結ぶ軸に関してほぼ対照に分子が配列されているが、電子が流れるのは上記の経路に限られている。

光化学系2複合体では、そのクロロフィルの電子励起エネルギーが蛍光や分子の運動のエネルギーとして散逸されるのではなく、ほぼ100%の確率で電子を動かすエネルギーとして利用されています。その電子移動はいくつもの段階を経ておこり、水と二酸化炭素から炭化水素と酸素をつくるために使われます。そこで、すくなくとも一番最初の電子移動は電子励起状態がなくなる数ナノ秒という時間よりもずっと短い時間の間におこってしまう必要があるわけです。実際数ピコ秒程度の時間でおこることがわかっています。電子移動を開始する場所（色素一タンパク質複合体）のことを反応中心（色素一タンパク質複合体）とよんでいます。

さて、そのような短い時間のあいだに起こる光誘起初期過程を時間分解して直接観測しようとすると、ピコ秒、フェムト秒のパルス時間幅をもった光パルスを用いる必要が出てきます。たとえば私が現在分子研で使える装置の場合、色素レーザーで200フェムト秒程度のパルス幅の光パルスをつくります（600から700nm）。また、測定に用いるサンプルは、光を透過しやすく、反射、散乱が小さい条件のほうが吸収や蛍光の時間変化が測定しやすいので、光化学系1複合体や光化学系2複合体などの色素一タンパク質複合体をチラコイド膜から別々に抽出して、界面活性剤で水溶液中に可溶化します。吉原先生と私はこれまで、帝京大学の池上勇先生、基礎生物学研究所の伊藤繁先生、岩城雅代博士と共同で光化学系1複合体について、また、ロンドンのインペリアルカレッジのデービッドクルッッグ博士らと共に、光化学系2複合体について、サブピコ秒から数十ピコ秒の初期反応を調べてきました。サンプル作成は共同研究の方々にお願いしています。

紅色細菌と呼ばれる光合成細菌の反応中心（色素一タンパク質）複合体では精度の高い立体構造決定がなされており（図2参照）、高速時間分解分光で得られるエネルギー、電子移動のデータが、クロロフィル等の分子配列とを照らし合わせて、活発に研究されています。しかし、残念ながら、光化学系1複合体と光化学系2複合体については、質のよい結晶ができないことから立体構造がはっきりとわかつていません。植物の光化学系複合体についても紅色細菌と類似の機能を有することが膨大な研究によってわかつていますが、全く同じではありませんし、異なるタンパク質から作られていますから、やはり立体構造も違っているはずです。現在のところ、植物の反応中心複合体の研究では、時間分解分光法で得られたエネルギー移動、電子移動の速度に関わるデータから構造的な情報を推論しているという段階にあります。

このような研究が何を目的に進められ、どのように役立つか、そして今後の展望は？ 次のようなことが考えら

れます。

1) 生物の光合成自体を改良できるのか？応用はあるのか？

光合成反応中心を人工的に改変して（DNAを操作して、特定のアミノ酸を変えたり、電子移動に関わる分子を交換したり）、エネルギー効率を上げられないかというような発想もありましょう。しかし、現在のところ、人工的に改変した反応中心複合体のエネルギー効率が、自然界のそれを大幅に上回ったという例は、私の知る限りなく、光合成生物のデザインが30億年以上におよぶ自然淘汰のなかでつくりあげられてきたという時間の重みを思い知るのがやっとなのではないかという気がします。一方、人間界で使いやすいものというと、かならずしも植物、細菌のような生ものは好まれません。光を使って電位差だけ作れたらよいという場合、太陽電池などのように半導体を用いる方が電化製品に組み込んだりしやすいわけです。また、ポリフィリンやキノンなどの有機分子を共有結合で組み合わせて（光合成反応中心の構造を模倣して）、光合成生物で行われるような電子移動を実現し人工光合成を実現しようとしているグループも世界にたくさんあります。実用化に近いとは言えないかもしれません、人間に都合のよい目的物（化学物質、電位差等）に応じて太陽光エネルギーを利用するためには一つの方法だと思います。そのためにもやはり、自然界で起こっていることをはっきりさせるのは必要なことでしょう。

2) 何を目的として研究するのか？

現在のところ、残念ながら、私の頭の中では、具体的に何に応用できるかという発想はなく、まだ理解できていない生物のしくみが明らかになればそれでよいと割り切っています。問題意識としては、生物学的観点からは、異なる種類の反応中心複合体がどのように、何故、違うのか？その相違は進化どのように関係するのか？物理化学的には、タンパク質は、その中に配列された色素間の励起エネルギーや電子移動をどのように制御しているのか？

3) これからしていくべきこと。

高速時間分解分光法、特に蛍光強度、吸収変化の測定精度は未だ光合成初期過程の理解のために十分ではありません。どこが難しいのかといえば、

(A) ある種の反応中心複合体や光捕集系では多数のクロロフィル分子が含まれ、レーザーパルスが容易に同一複合体中の複数のクロロフィルを励起してしまいます。クロロフィル分子は互いに非常に近接していて（分子の中心間距離が8～15オングストローム程度）、励起されたクロロフィル分子の間で容易に相互作用を生じます。ですからなるべく弱い励起光パルスを用いる必要があります。弱いレーザービームを使うことはサンプルを傷めないためにも

必要です。

(B) サンプルの条件によっては、長寿命の光生成物を生じます。長寿命の電荷分離状態をつくるのは自然な光合成過程では当然なことなのですが。光パルスの繰り返し数を上げてシグナルを高速に積算したいと思ってもその繰り返しをある大きさで制限したり、逆にサンプルを高速で回転させたり、流す必要が出てきます。

(A)、(B) のような要求があるためにシグナルノイズ比の高いデータを得ることが常に容易ではありません。ですからより安定なフェムト秒光源や、測定のための光学系、データ取り込み、処理の最適化が求められます。

ところで、極低温での光合成反応中心での電子移動速度は常温でのそれに比べてほとんど同じかむしろ速くなるという報告があります。これは電子移動反応が熱活性化を必要としないと解釈できます。一方、クロロフィル分子間のエネルギー移動は温度に強く依存するようです。極低温での実験データを常温でのそれと比べることで、熱によって揺らいでいるタンパク質という環境の影響を評価する事ができるでしょう。光化学系1複合体の電子移動に関しては温度効果の測定がほとんどなされていませんので、これららの研究課題であると思います。

My Interactions with Science and Social Activities in IMS and Okazaki

Department of Electronic Structure Dr. Haridas Pal
(Bhabha Atomic Research Centre, Bombay, India)

I came to IMS, Okazaki on March 1994, as a JSPS post-doctoral fellow to work with Prof. Keitaro Yoshihara. Thanks to JSPS for offering me the fellowship and thanks to Prof. Yoshihara for considering me to work in his group in the field of ultrafast chemical dynamics.

I have already spent almost two years in this institute. Though my coming to Japan was mainly for science yet during my long stay here in Okazaki I had come across with many things related to both science and social activities which give me some reflections about the scientific environment in IMS and also about the life of a foreigner in Japan. Thanks to Kanae to give me the chance to express my feelings to its sensible readers.

In my feelings IMS is just a fantastic scientific institute. Considering both the research facilities provided by the institute and the working atmosphere available here I feel that IMS is a very nice place to carry out research in the frontier areas of science. This is in fact very evident from the scientific achievements of the researchers in this institute.

I was very much interested to carryout my post-doctoral research in IMS, one of the best scientific institutes all over the world to go along with the advanced scientific research. I was really very delighted when I got the offer to work in IMS with Prof. Yoshihara and that too in the field of ultrafast chemical dynamics, a research field which I was dreaming for a long time. My dream comes to reality when I produce some interesting results in the interesting field of ultrafast intermolecular electron transfer processes occurring with rates much faster than the solvation dynamics. I observe how the rates are affected on using the isotopically substituted donors and acceptors. The results give me a better insight about the mechanism of these ultrafast chemical processes. My research in IMS gives me a good extent of satisfaction and pleasure and I hope it will boost me up in my scientific career. I convey my special thanks to Mr. T. Yamanaka whose help in the operation of the femtosecond titanium:sapphire laser was really fruitful to me to produce the results on the ultrafast electron transfer dynamics.

My staying in IMS and also in Okazaki, to say in

short, have been just with exciting and enjoying experiences, both scientifically and also with social interactions. I came to know many interesting things about Japan and Japanese culture through my colleagues and through the different activities of Okazaki International Association(OIA). Parallel to IMS, OIA is also trying a lot to make the life comfortable for the foreigners in Okazaki. I heartily appreciate the efforts of OIA in this regard.

I sincerely remember the get-togethers arranged by OIA in many occasions, which have been the best opportunities for me to interact with common Japanese people of Okazaki. I get delighted to see that many common people are very much interested to know about India, specially its social life. It really makes me proud when I see that a Japanese appreciates our social structures.

I appreciate the great efforts of OIA to arrange a free Japanese learning class for the foreigners. Though I had not been able to utilize the scope for my own yet it makes me delighted when I see that my wife speaks in Japanese with her Japanese friends and also in the daily life interactions with the Japanese people. Many many thanks to OIA for its sensible and very useful efforts.

I also remember the occasions of get-together arranged every year by the Okazaki Rotary Club. It is also a great opportunity for the foreigners to mix up themselves with Japanese people of different professions.

How I like Japan in general? Who does not like a country which is decorated with its beautiful seasons. Japan, the country

科学講座「知って得する分子科学の常識」

レーザーの話(第4回)

装置開発室 浅香修治

今回の内容はレーザー装置の具体的構成です。

5. レーザーの具体的構成と種類

【各種レーザー装置の構成】

ここでは分子研の中でも多く使われているレーザー装置のうちから、エキシマーレーザー、アルゴンイオンレーザー、色素レーザー、ネオジム・ヤグレーザー、チタン・サファイアレーザー、半導体レーザーを取り上げます。UVSOR施設で実験されている自由電子レーザーについては述べません。

特徴あるそれぞれの装置について少し詳しく説明します。

エキシマーレーザー

ふたつの中性分子の距離を近づけると、一般的には反発力が働きます。しかし片方が基底状態、もう片方が励起状態になると、ふたつの間に引力が働いて化学結合する場合があります。このように結合したものをエキシマー(excimer)と呼びます(図9)。このエキシマーのふたつの準位間の遷移を使って誘導放出を起こさせるのがエキシマーレーザーです。

基底状態(①)の単原子分子または多原子分子気体を何らかの方法で励起してやり(②)、エキシマーの結合状態(③)を作ります。この結合状態は自然放出または誘導放出により「基底状態」(④)に遷移します。しかしこの「基底状態」は実は非結合、つまり斥力が働いてふたつの原子にわかれてしまう状態なので直ちにもとの状態(①)に戻ります。この4つの量子状態を1サイクルとして考えればこれは4準位レーザーです。下のレーザー準位(④)の占有数は直ちになくなるので、励起さえすれば③④間に容易に反転分布が実現し、効率の良いレーザー作用が期待できます。レーザー発振波長は③と④のエネルギー差で決まります。

市販の多くのエキシマーレーザーではレーザー媒質として、効率の良さから、希ガス・ハロゲン(rare gas halide)エキシマーを用い、これらはガスレーザーに分類されます。たとえばArFエキシマー(発振波長193nm)、KrF(249nm)、KrCl(222nm)、XeF(350nm)、XeCl(308nm)などです。励起(ポンピング)方法はパルス的放電による励起が一般的です。

実際にレーザー装置に入れてやるガスは希ガスとしてAr、KrまたはXeが数%、ハロゲンガスとしてCl₂またはF₂が1%以下、残りの90%ほどが全部HeやNe(buffer gasとよばれる)で全体で1気圧程度の混合ガスを用います。レーザー作用に直接あずからないbuffer gasを用いるのは、HeやNeのような分子量の小さなガスの方が放電によって効率よく励起・イオン化され、これとの衝突によるエネルギー移動でAr、KrやXeの励起状態を作るという設計になっているからです。

装置の構造はおおよそ図10のようになっています。長さ1mほどのレーザー媒質ガス容器の中に平行にふた

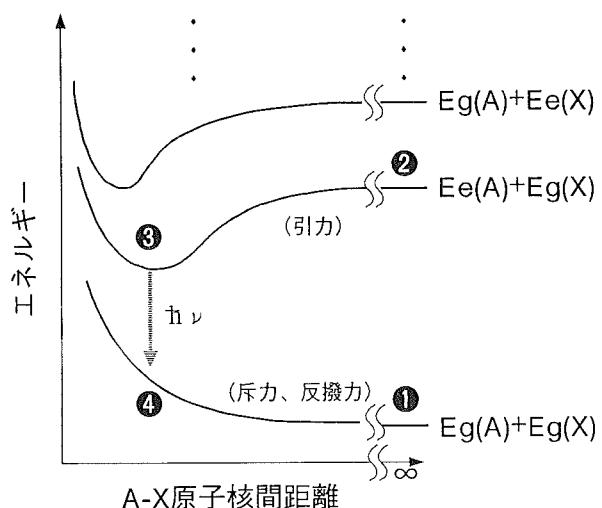


図9

ふたつの原子A、Xの核間距離に対するエネルギー、
 $Eg(m)$ はm原子の基底準位のエネルギー、
 $Ee(m)$ はmの第一励起準位のエネルギー。

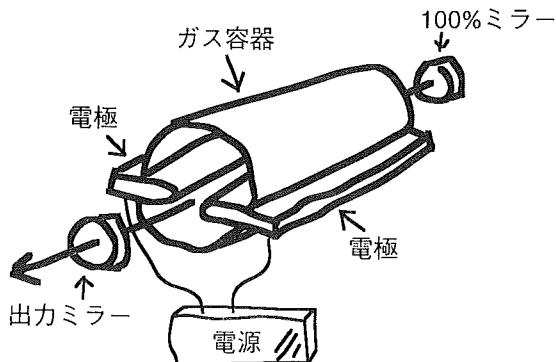


図10 エキシマーレーザーの構成

つの電極を配置し、そのあいだでパルス的に放電を起させます。放電方向とは直角に(電極と平行に)光が増幅されて進行します。このタイプのレーザーはレーザー媒質の単位長さあたりの光増幅率が非常に大きい($\sim 10\%/\text{cm}$)という特徴があります。このため、ほとんど一回だけの光の通過で誘導放出によりすべてのエキシマーが励起状態から「基底状態」に戻り、ポンピングによって得たエネルギーを使い果たすので、レーザー作用が停止します(誘導放出確率は入射光の強さに比例する。前述)。ですから一応両側にミラーをおいてはありますが、これらで構成される光共振器の中を何回も往復して発振させるというよりは、後ろ向きに出てきた光を前方に反射させるだけの役目就近いものです。

ここで寄り道して放電について少し述べておきましょう。

放電とは…気体(または液体)の中にふたつの平面電極を置き、そのあいだに電圧をかけます。そうするとたまたま電極の間にあった電子が正極の方に引かれて加速され、その電子のいくつかは気体分子に衝突します。

電極にかける電圧が小さい場合には、電子が飛行して分子にぶつかるまでの間(この距離を自由行程という)に速度があまり大きくなないので、衝突した気体分子の速度を変化させることしかできません。電圧が高いと電子は大きく加速され、衝突された分子は電子の運動エネルギーを受け取って励起状態に上げられるようになります。

さらに電圧を上げ、衝突する電子の運動エネルギーが分子のイオン化エネルギーを越えるようになると、衝突された分子が正イオンとしてイオン化され、気体分子の中にあった電子が分子の外に出ます。ぶつかった方の電子はエネルギーを失って止まってしまいます。この2個の電子、もともとの電子と新しくできた電子、はまた正極に向かって加速されるので、これらが今度はほかの気体分子をイオン化します。それでできた電子が加速されてさらに別の分子を…。衝突でできた正イオンもまた負極に向かって加速され、それが別の気体分子をイオン化します。こうなると電子・イオンの数が爆発的に増大し、正極には電子が、負極にはイオンがなだれうって到達するようになります。つまり電極間に大きな電流が流れることになるわけです。これが静電場による放電現象です。

最初の「たね」は電子でもイオンでもよく、地球上に降り注ぐ宇宙線の作用で地上にある気体中にはイオン・電子がほんの少量ですが絶えず作られています。また電極自身からも電子が飛び出しがあるので、これも「たね」になります。放電が開始する電極電圧は、「電子が平均自由行程の間に獲得する運動エネルギー」 = 「気体分子のイオン化エネルギー」として見積もれますから、この電圧は電極間隔と気体の圧力に比例する事がわかります。1気圧の

空気の場合は1mm間隔で約1kVです。

話をレーザー装置に戻します。希ガス・ハロゲンエキシマーの場合、放電開始電圧は数 kV/cm・atm ですので、数 cm の電極間隔の装置では約 10kV の電源が必要です。上のレーザー準位の自然放出の寿命はおよそ数 nsec であり、効率よく発振させるにはこの時間内に十分な励起を行う必要があります。ゆっくり励起していくには十分な反転分布を作る前に自然放出で上準位の占有数が逃げてしまいます。また長時間安定に放電を維持するのは技術的に困難です。この短時間にこの電圧パルス(電流は数 10kA)を安定して発生させるために、今日では一般にサイラトロン(thyatron)というスイッチが電源部に使われています。これ自体が実は放電管で、少量の水素が入った3極管構造をしています。グリッドに制御電圧を与えてスイッチ・オンします。

希ガス・ハロゲンの放電を毎回安定に同じ状態で起こさせるためには、人工的に「たね」を作つてやるのが有効です。主放電の直前に多数の小さな放電を起こさせてガスを少しだけイオン化し、あるいはその時発生する紫外光により主放電電極表面で光電効果による電子を飛び出させるというのが一つの方法です。

市販されているエキシマーレーザーの出力光は、波長は上に書いたとおり、パルス幅は数 nsec～数 10nsec、パルスあたりのエネルギーは 0.1J～1J です。パルスピーカー強度でいうと 100MW 程度です。パルス繰り返しは最大で 1kHz～10kHz 程度ですので平均強度は最大で 10W ぐらいになります。繰り返しの上限はガス容器内のガスの循環速度(一度放電にあづかったガスはしばらく放置しないと再利用できない)と電源の性能で決まっています。出力光の断面形状はたいてい縦 1cm、横数 cm ほどの長方形です。非常に不完全な共振器構造しか持たないので、特別な方法を講じない限り、出力光の空間コヒーレンス・時間コヒーレンスは劣悪です。従つてすこしの距離を飛ばだけでビーム形状が乱れます。これを色素レーザーの励起などに用いる場合には両者をできるだけ近づけて置く必要があります。

市販のエキシマーレーザーは一度ガスを入れるとバルブを開じて使用し、そのまま長時間使っていくと出力が低下してきます。これは中のガスの純度が低下してくるためです。そうなると新しいガスを入れ替えてやることが必要です。しかしハロゲンガスなどという危ないものはだれも頻繁にはさわりたくないものです。ガスの純度劣化の原因はおもに、レーザー装置のガス容器内に使われている各種材料が強い紫外光にさらされる結果、光化学反応により不純物気体が発生するためです。近年、それらの材料を見直して、ほとんどガスを入れ替える必要のない機種も登場してきました。

次回はアルゴンイオンレーザーなどを紹介します。

“声” 「本音を言わせて、聞かせて」

実験装置の作成環境のカスタマイズ

名古屋工業大学 森 義 仁

分子科学研究所から現在の職場にきて1年が過ぎようとしているが、実験装置の作成とその調製・改良に何かと時間を費やしてしまったような気がする。通常、実験装置を作成し、それを調整・改良していく段階で実験装置作成の環境がカスタマイズされていく。実験装置の作成に使われる道具の操作性は実際に使ってみなければ分からぬことが多い。その選択は試行錯誤によることが少なくはない。同じ目的のための道具であるがちょっとした形や重さの違いがその実際の操作性を大きく左右することもあるかも知れない。作成時特有の時具(治具)というものも登場する。時具(治具)の中でもその目的に応じて設計・作成されたものもあるが、本来の目的とは異なるところでその使用されているというものもある。ガラス板を切るときのガイドに雑誌が最適であるなど、どの書籍を見たことはない。もしかすると虎の巻集がどこかにあるのかもしれない。実験室内にどれだけの道具があるかというだけではなく、実験室を取り巻く環境もまた重要である。ある形のねじが欲しいときには、しかるべきところに行けば手に入るということが分かっていることは重要である。このような事柄の積み重ねられられ、実験装置作成や調整の環境が快適なものにカスタマイズされる。

しかし、仕事場が変わると、このあたりの事情というものが一変する。カスタマイズされていない環境で、実験装置を新たに作成するには、何かにつけて時間を必要とした。実験のための電気回路を一つ作成するために、必要な道具をあちらこちらから探し、収集するだけで半日が消費される。このようにして新しい職場でまた実験環境のカスタマイズを開始することになる。幸いにして必要となる小道具はそのほとんどが私が所属する講座内で見つけることができた。しかし、最初にすることは、その道具の在処かがどこであるのかを知っている人を探すことであった。またあるコネクタやねじが欲しいときには自転車で大須のパーツセンターに行くこともあった。私の実験で自作を必要とする装置はほとんどが小型のものであるので、時間は多少長く必要としたが、どうにか独力で実験装置を作成することができた。私が所属する講座では研究目的に応じた実験装置を作成することが頻繁があるので帶鋸盤やボール盤等の材料加工装置があり大いに助かった。

今年度に私が作成したような比較的小型で作成が容易な装置を作成する場合には現在の講座内の加工装置で十分であるが、今後、この工作環境では困難な実験装置が必要と

することもあるかも知れない。このようなときには当大学では工作・試験センターというところに駆け込むことになっている。

当センターは学内共同利用施設として位置付けられており、旧機械工学科の実習工場が母体となっているらしい。その目的は工作機械を集中管理して、教育・研究の発展の基盤の一つとなることである。残念ながら私は赴任いらい一度もお世話になっていないのであるが、当センタの利用手引きや報告書を見ていると種々の加工装置が設置されている。

何か機会を作りぜひお世話になってみたいと考えている。利用手引き[1]や報告書[2]によると、当センタは平成2年11月に発足し、組織は(1)機械加工部門・(2)電気回路部門・(3)大型試験部門・(4)工作実習部門・(5)技術相談・サービス部門の5部門から成る。そのうち実質的に活動しているのは(1)・(4)・(5)の部門である。当センターでは現在、2人の専任職員の方によりサービスが行われている。(5)の技術相談・サービス部門では学内の教職員・学生を対象に機械加工技術講習会が年2回の割合で実施されているようである。

この一年間で、私にとっての装置作成の環境が大いに快適になったと思う。その効果は、今後、実験に応じて装置を作成・改良するときに現れるであろう。今年は工作・試験センターも利用して見ようと思う。望みは実験のアイデアを思い付いたとき直ちにそれを実現することが装置を作成できる環境である。

[1] 工作・試験センター機械加工部門利用の手引き、
名古屋工業大学工作・試験センター、平成3年4月

[2] 工作・試験センターニュース、第3号、
名古屋工業大学工作・試験センター、平成7年8月

「あれこれ」

名古屋大学理学部装置開発室 鈴井光一

名古屋大学理学部に勤務されていた鳥居龍晴氏と私の人事交流が成立し、平成7年10月1日付けて転出いたしました。分子研と名古屋大学の雰囲気は当然ながらかなり違うので、何かと戸惑うことが多かったのですが、最近やっと慣れて参りました。名古屋大学では、分子研の装置開発室と同じ様に研究装置の開発、製作を行う部署に所属しています。その部署の名称も理学部装置開発室と言い、本家と元祖の争いが起るかもしれません。業務のスタイルはほぼ同じだが、開発する装置の分野が、分子研の装置開発室とは大きく違っており、同じ装置技術でも新しい気持ちで取り組むことができます。

理学部装置開発室(以下、名大装置)のメンバーとは、機器の利用や技術交流などで幾度となく顔を合わせた事があるので、まるで知らない方ばかりではなく、見知らぬ職場でもありません。また、学内でも分子研に勤務されていた方を、あちこちでお見かけする事がありますし、共同研究などで分子研にこられて拝見した方も多数おられます。岡崎と名古屋大学とはさほど遠くはありません。従って、異国の地とは言い難く、新任地での気苦労が軽減され、この点は助かりました。単に通勤時間が長くなつた様なもんだ、と思ってます。

まだ赴任して間もないのですが、分子研ではあり得ないフィールド実験を経験したり、分野の違う技術に遭遇したなど、名古屋に来て感じたことを、以下に綴ってみます。なお、この原稿は名古屋大学の「理学部技術報告」に掲載させていただいた文を「かなえ」用に修正した物なので、両方読まれる方は、ご容赦願います。

(設楽に出張)

11月の初旬、ダム周辺の気象変化シミュレーションモデル作成の基礎資料収集を行うゾンデ観測に参加するため、名大装置の増田氏と設楽町に出張した。本来の目的は、工作依頼されたゾンデ観測用装置の設計をするための内容や技術ノウハウを修得するためのものであった。つまり「百聞は一見に如かず」と言うことである。観測の期間は1週間、しかも野外での業務。分子研ではほとんどあり得ない事で、けっこう充実した体験であった。場所は北設楽郡設楽町大字八橋、設楽町で一番大きな街の”田口”から車で15分ほど山あいに入った所である。途中「豊川」の支流「境川」沿いの道で車を停めて川面を眺めていたら、カワセミがいた、さすが自然の残る山

奥と思わせる光景であった。

昼夜間わず3時間おきのゾンデ観測を2~3人の構成で行い、幸いにも私は2交代の昼班で業務する事ができた。何もかも初めての者にとっては、最初の1~2日は「緊張」であった。その2日目の夜に、ゾンデ追尾アンテナの故障が発生し、原因究明、応急処置、対応の仕方など、良い勉強をさせられた。トラブルの間は他のスタッフの行動を、感心しながらただ脇で見ているだけだったが、スリップリング(回転摺動電気接点)の結露等による接触不良が原因とわかつてからは、夜間に冷えない様にする為のヒーターを取り付けなど、その後の処置作業では役に立てたと思う。

観測も慣れてくると3時間おきとはいえ次の観測まで時間の余裕が出てくる。近くの山に散歩でもと思うが、つい数日前に顔合わせしたばかりの観測メンバー(学生もいたが、昼班は私より年配の人ばかりであった)と一緒に居るので結構気を使っていた。私は、人付き合いが良いのとクセのない性格(そう思っている)だが、その分だけ気を使って疲れる。幸い、話題の豊富な方が一人いたので、話の聞き役で観測の合間の時間を過ごせた。旅行とは違って、四六時中一緒に仕事と言うのも大変なことである。

余談ですが、設楽の田口といえば分子研の日本酒愛好家グループの中でも特に誉れの高い”蓬萊泉(ほうらいせん)”の蔵元の地である。10年ほど前に私も一度だけ極低温センターの加藤班長に、その酒屋に連れられて行ったことがあった。このことはすっかり忘れていたのだが、田口の街並みを見た時その”蓬萊泉”に気がつき、懐かしい思いをした。もちろん、みやげに買って帰った。

(CAD文化)

最近は設計図面を描くのに、鉛筆やコンパス、定規といった製図道具はほとんど使用されなくなっている。分子研でも数年前から製図台はなくなつて図面はCADを使って描くようになっている。一長一短はあるものの、便利な道具である。これになじめないと言っても、CADの操作は何が何でも習得せねばならなかつた。

名大装置にも製図台がない。2次元CADなど、線を引く、消す、修正するなど、どれも同じだし、パソコンやワークステーションなど特に嫌いではないので、別のCADでも2~3日いじれば、人並みの図面は描けると、

自信はあった。実際は問題ありであった。今まで使っていたCADソフトに慣れ、他のCADソフトは受け入れ難い体質になっているのに驚いた。別のCADの操作を憶えようすることが、苦痛に感じると言うことは、とうとう中年のおっさんになったのかと、愕然となりかけた。こんな愚痴を、名大装置で話していたら、誰かが「CADは文化ですね」と言ってくれた。他の文化はそう簡単に理解できないと、勝手ながら納得してしまった。

分子研に転勤した鳥居氏も同様らしく、何度か電話で慰めあった。しかし、いつまでもこんな事を言ってられないで、現在奮闘努力をしている。

(技術の分野)

私の前任者である鳥居氏が「衛星搭載用GSPC^{<1>}のペリリウム窓の開発」を主に行っていた。後任である私が、引き続き開発を進めることになった。そのために、約2週間ほど引継ぎを行った。Niの窓基板に25ミクロンのBe薄板を真空ロウ付けする技術の開発だが、その試作実験と手法の探索が非常に系統立って行われているので、大変勉強になった。これらとは別にペネトレーター搭載用月地震計^{<2>}の姿勢制御部の開発なども数年前から行われている。ペネトレーターの開発業務などは月探査計画が間近に迫っており、大詰めの段階である。その開発に関する報告書や論文のぶ厚い束を見て今までの苦労がうかがえる。

分子研では化学の分野の装置技術が仕事として大きな位置を占めており、これまで機械屋としてこれらに携わってきた。ここ名大装置では、扱う技術の分野として

は非常に幅広い。その中でも特に、古くからロケット搭載用赤外線観測器を手掛けたり、地球深部観測用の震源装置、前述したゾンデ観測用装置、鳥居氏のやってこられた衛星搭載用GSPC窓、ペネトレーター内部の回転機構など、ロケットだの月や惑星の探査だと、単語を聞くだけでロマンがあり大変興味をそそる。機械屋としてはおもしろそうでつい浮かれそうだが、名大装置のスタッフは割と冷静に構えている。私も、これから徐々にクールになっていくのだろう。

まだ他にも書いてみたい事は沢山ある。例えば、毎月、宇宙科学研究所で開催されるペネトレーター設計会議で1日中缶詰にされ、そこで企業の技術者達を見て感じたこと。大学内部で技術部が組織されているが、その中の各々の技官が考えていること、あるいは分子研の技術課と比べて感じたことなど。

本来この「本音を言わせて聞かせてコーナー」には、この手の話題の方がふさわしいと思いますが、それについては次号にでもまた掲載させて下さい。

<1>,<2>

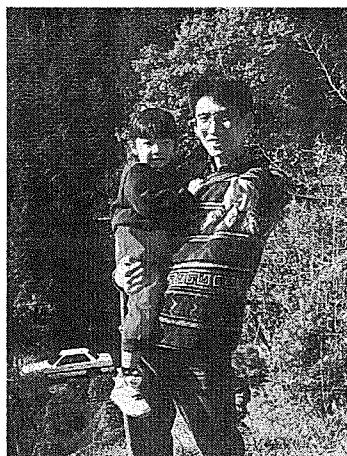
これらの言葉の説明は、装置開発室の鳥居技官に聞いていただくと、よく解ります。また、以下のWWWホームページを参照されても出でます。

<http://www.isas.ac.jp/>

特にペネトレータは

<http://aofuji.eng.isas.ac.jp/info/future/lunarA-j.html>

に詳しく説明されています。



慣れ親しんだ職場から新たなる職場で

装置開発技術係 鳥居 龍晴

私は、1995年10月1日付けで分子科学研究所(分子研)の装置開発室に鈴井さんと人事交流で転任しました。私は今(1996.1.1)から19年9カ月前に名古屋大学理学部金属工作室(現在は装置開発室に改名)に着任しました。着任する前は大学というと、学生と教官および事務職員までは頭に思い浮かびましたが技術職員がいることは想像もしませんでした。採用時の面接で研究・教育のための実験装置を作っている工作室を案内され、工学部以外に工作機械が設置してあることに驚いたのを今でも記憶しています。その後、名大でクライオスタッフ等低温装置、電波望遠鏡用ミラー、衛星搭載用紫外線及びX線用窓、月探査用地震計の姿勢制御機構等の開発を行ってきました。

名大着任当時は、初代技術課長(高橋重敏氏)が課長就任以前に、名大理学部金属工作室のリーダーとして働いておられたこともあり、真空の勉強会、技術研究会等を名大と分子研とで合同で行っていました。私と同年月日に分子研に着任された鈴井氏とはそれ以来の付き合いがあります。それと、同じ様な装置開発の仕事を行っている職場のため、全く未知の世界に飛び込んだという感覚はありませんが、私自身が未熟なことと、使用する機械等(コンピューターのハードおよび、ソフトウェアや工作機械)が違うことで時々周りの人々に迷惑をかけております。

私が感じた名大と分子研の大きな違いは、1つ目として技術組織に対する考え方です。創立当初から技術課があり組織的に運営されている分子研と、まだ組織化がされて数

年たっただけの名大とでは違うのも当然です。分子研では運営はもちろん人事に関することも技術課を中心に行っていきます。また、事を進める場合は上(組織図の上司)から決められていく命令形態が、ある程度技術職員の中に定着しているように感じています。

2つ目は、研究者の在職期間の違いがあります。研究者の昇格(助手から助教授、助教授から教授等)が名大では内部でもありますが、分子研では、基本的に内部昇格がありません。昇格時には分子研から離れて行かれる研究者がほとんどで、在職期間が名大と比べて短い研究者が多いことです。そのため、装置依頼から完成までの時間が短く、じっくりと開発を行うことにも制限があることです。このような違いはありますが、一日も早く分子研のスタイルに慣れ、名古屋大学で身につけた技術を土台にして新技術(私が知らない技術)の腕を磨くつもりでいます。また、技官の人事交流は全国的にみても珍しいことだと聞いております。今後も全国的に人事交流が盛んに行われていくよう、名大と分子研の双方がますます活性化し、「人事交流を行って良かった!」と言われるように頑張りたいと思っています。

転任して自分でも不思議な発見をしました。名古屋から通勤しているため、通勤時間が1時間半程度あり、読書嫌いの私が本を読む時間ができたことです。

編集後記

『かなえ5号』が発行の運びとなりました。前号は昨年9月刊行でした。あれから半年あまりの間に、内田章技術課長が退官され新しい課長が誕生し、さらに技官の研修制度がスタートしました。また、これまでかなえの編集を担当していた鈴井光一氏が名古屋大学に転勤されました。編集作業の引き継ぎはうまく行えたものの、いざ実際に取りかかってみると、思いの外たいへんな作業であることに気づきました。初めての編集作業で不足な点も多く細部にミスもあるかと思いますがどうかご容赦ください。お気づきの点がありましたらどうぞ遠慮なく編集委員までご連絡下さい。今後のかなえの編集に役立て、より親しみの持てる冊子になればと考えています。

(編集担当 堀米利夫)

分子科学研究所技術課活動報告「かなえ」編集委員

酒井楠雄(委員長)

加藤清則

松戸修

西本史雄

堀米利夫

永田正明

山中孝弥

吉田久史

かなえNo.5

発行年月	平成 8 年 3 月
印刷年月	平成 8 年 3 月
発 行	岡崎国立共同研究機構 分子科学研究所・技術課
編 集	か な え 編 集 委 員 会
印 刷	有 限 会 社 研 文 印 刷

