原子の世界を体験する

金山 敏彦

アトムテクノロジー研究体, 産業技術融合領域研究所 ☎ 305-8562 茨城県つくば市東 1-1-4

(1999年6月21日受理)

Experimental Introduction into the Atomic World

Toshihiko KANAYAMA

Joint Research Center for Atom Technology, National Institute for Advanced Interdisciplinary Research
1-1-4 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8562

(Received June 21, 1999)

This article describes a series of demonstration experiments, which were exhibited to general visitors in open days of our research institute. The intention is to provide the people with an opportunity to actually experience by themselves why and how atoms assemble to form various types of materials. At the same time, these experiments are designed to be an enjoyable introduction to our research activity.

1. はじめに

筆者の所属する工業技術院の研究soでは、ほぼ毎年1回、所内の一般公開を行っている。ここで紹介するのは、96年から昨夏までの一般公開時に行ったアトラクション実験の一部である。これらの出し物は、見ておもしろいというより、自分であれこれさわって楽しめると同時に、筆者のグループの研究内容の紹介となることを意図している。

理科離れが叫ばれるようになって久しい。ことは若者だけではなく、一般の非専門家にとっても、最先端の科学や技術は急速に、内容が窺いしれないブラックボックスとなっていることが懸念される。心配の対象は、科学そのものだけではない。それを研究している研究所も、ますます疎遠な存在に受け取られているのではないだろうか。これが、公開を続けている理由である。ところで、筆者の研究室には、クリーンルームの中に超高真空装置や走査型トンネル顕微鏡が並んでいる。この研究現場を単にかいま見ただけでは、研究所に親しむどころか、逆の印象を持ちかねない。

以下に紹介する実験では、完成品の装置や器具だけを

使うものは1つもない。あり合わせの材料で筆者が手作りしたもの、ほとんどである。これには、我々がびかびかの高級車を乗り回すように完成した装置を操って研究しているのではなく、研究者の発案と工夫で道具を作り、ミクロな世界に迫っているということを、少しでも感じ取ってもらいたいという意図が込められている。

というわけで、以下に述べるのは、科学マジックショーではなく、研究内容紹介の序章である。一連のコースを用意してはいるものの、フルコースというよりはオードブルだ。それぞれの実験はすべて参加者に手を下してもらいが、研究者が立ち会って意味合いを説明している。むしろ、メインディッシュは、本稿では触れないその説明にある。

とは言っても、どんな研究内容を紹介したいかを少しだけ記しておこう。筆者は現在、アトムテクノロジーなるプロジェクトに従事している。その名の通り、このプロジェクトでは、物質の成り立ちを原子の単位で制御することを目的に、固体表面や超高真空の空間中で原子や分子の反応や凝集の挙動を観察し操作する技術を研究している。これに対応して、ここで取り上げている一連の実験のテーマは、一言でいえば、原子がなぜ如何に凝集して様々な物質を形成するかである。日常的な道具立てでも、ほんのちょっと工夫すれば未知の状況が現れて意

外に楽しめることを体験し、研究が普通の生活とそれ程かけ離れた世界ではないことを理解してもらうことを期待している。

2. 原子の世界を体験する実験コース

2.1 原子の間に働く力を実感しよう—鉛の圧着

コースのはじめには、通りすがりの人々の関心を引きつける、インパクトのある実験が必要である。そこでガリレオ工房のアイディア¹⁾をお借りした。はじめに、鉛でできている魚釣りの重り（ナス10号など、釣具店で¥80程度）にひもをつけたものを用意しておく（Fig. 1）。2つの重りの端をカッターナイフでできるだけ平らに削ってフレッシュな面を出し、押しつける（少しねじりを加えるのがコツ）と、ひとりでにくっついてしまう。ふつうの鉛の表面は酸化して黒ずんでいるので、カッターナイフで削りだした酸化していない金属光沢面との違いは一目でわかる。これをもう一度、引きはがすのに何kgの力を要するかを、Fig. 1のような仕組みで、各自に計ってもらう。市販のバネばかり（Do-it-yourself店で¥1,500位）にテフロン製のリング（Fig. 1でバネばかりに巻いた白い鉢巻き）を取り付け、最高値が読めるように工夫した。

くっつけた重りが耐えられる力は、かなり雑に削っても1kg近く、慎重に削って接触面積を増すと5kg位にはなる。これまでの最高は、用意したバネばかりの測定限界10kg以上を記録した。この実験はなかなか人気があり、5kg以上を出した人の名前を壁に貼りだしたこともあって、1時間以上粘って記録をねらう人も現れた。このように重りを引きはがすには意外に強い力を要するので、はがれた瞬間に力余ってつんのめったり、バネばかりのバネの力で重りが飛んでしまうなど、安全に注意する必要がある。カッターナイフで削るような人は一人もいなかったが、皆、重りを削るのに熱中してしまうので、カバーがないと机が傷だらけになる。このために我々は大判のプラスチック下敷きを使って、重宝している。

このデモ実験のねらいは、固体の凝縮力を体感してもらうことだ。破断力を計測した後に破断面を見ると、実際にくっついていた面積はごくわずかなのに気づく。鉛のような金属の原子の間には互いに強い力が働いていて、固体としての鉛を形作っている。ふだん鉛の重りを手にした時にこれに気づかないのは、表面が酸化物や水分などでおおわれてしまっているためである。これを取り除いて、適当な条件の下で鉛の原子どうしを近づけると、ひとりですぐ合体してしまう。これは、合体した方が、エネルギー的に安定な状態になることに基づく。

Fig. 1 Bonding experiment of lead fishing weights.

この状況は、我々が行っている研究内容を象徴している。実際の研究では、鉛の重りではなく、原子や分子を超高真空中のイオントラップ²⁾や固体の清浄表面上で操作し、結合させることでナノ構造を作製している。つまりは、不要な夾雑物を取り除き、目的の原子本来の結合を生じさせることで、自己形成的に構造を作る点が共通している。鉛の重りを接触させただけで、予想外に強固に接合するという意外性の他に、この共通性がコース最初のイントロダクションに格好である。この実験で酸化膜をはぎ取る効果を実感してもらうと、実際の研究ではなぜ超高真空が必要かが無理なく説明できる。

ということは、鉛だけではなく同じような接合が、すべての固体材料について行えるはずである。実際、超高真空中で原子的に平坦な表面に対してはそうであることは、本紙の読者は先刻ご承知であろう。鉛がこのデモンストレーションに適しているのは、酸化の進行速度が遅いことと、柔らかいので組成変形を起こすことで接触面積が著しく大きくなることである。

2.2 原子を引きはがそう—脆性破壊と疲労破壊

もう少し固い材料で、原子間の結合を体験するのが次のテーマで、シリコンとアルミ合金の薄片を壊して違いを体感してみる。我々のグループは、主にSiを研究対象としている。また、新聞やテレビなどで、「シリコン」

という語をよく目にする割には、多くの方は実際に Si を見たり、いわんや手に取ったりする機会はないのではないだろうか。一般には、Si とシリコンを混同して豊胸材のイメージが強く、ゾル状の物質を思い描く方が圧倒的に多いようである（筆者は、大学院の講義でも、こう思い込んでいる学生が結構いることに驚いたことがある）。そこで Si ウェーハを壊してみ、脆性破壊を体験してもらい、比較の対象にアルミの疲労破壊をとというわけである。筆者の研究グループには、使わなくなった Si ウェーハや実験装置を作った残りのアルミ板がたくさん転がっているの、費用もかからない。

Si ウェーハを手で割った経験を、読者の中でどのくらいの方がお持ちだろうか。あるいは、ダイヤモンドカッターでスクラッチをつけた後で劈開しようとして失敗し、ウェーハがバラバラになって途方に暮れたことのある方が多いかもしれない。Si とアルミ合金は、一見すると両方とも同じように金属的に見える。しかし、同じ 0.5 mm 程度の厚さの薄片を手にとりて曲げてみると、アルミは簡単に曲がるのに対し、Si は多くの場合、一瞬にして Fig. 2 の右側のようにバラバラの薄片に割れてしまう。一方、アルミも一度曲げたところを元に戻し、同じところを何度も繰り返し曲げていると、次第に端から亀裂が入り、最後はポロリと割れてしまう。いわゆる疲労破壊による破断である。割れた断面を見てみると、Si の断面は光沢があり、平らな部分が集まってできていることがわかるが、アルミの方は凹凸が激しい。

この差はもちろん、共有結合と金属結合の相違に基づく。Si の劈開性は、イオン結晶や GaAs など化合物半導体のような切れの良さとは異なり、応力集中が起こらない状況で割ろうとすると、上記のような制御不能な結果になる。アルミと Si は周期律表で隣り合う元素である。1 原子あたりの電子の数がわずかに 1 個違うだけで、このような差が現れる。原子の個性の差が、材料のマクロな

Fig. 2 Photograph of a Si wafer of 60-mm diameter, and crumbled pieces of a wafer.

スケールの特性を規定している好例で、この簡単な実験を種に、いろいろな説明が展開できる。

2.3 原子をこわしてみよう—手作りガイスラー管

では、原子そのものの個性を見てみるにはどうすればよいだろうか。最も簡単で直接的なのは、低圧気体の放電で原子を壊してみることである。

理科実験用の Y 字ガラス管 (9 mm 径、¥300) の 2 本の口に太めの針金を差し込み、挿入口をエポキシ接着剤でふさいで真空シールし、ガイスラー管 (放電管) を作る (Fig. 3 上)。次に Fig. 3 下のように、Y 字管の根本の口に、ゴム管を介して使い捨て注射器を接続する。最近の使い捨て注射器 (ポリプロピレン製、容量 50 cc 位、¥200) はシールが優れていて、十分に真空ポンプの代わりを果たす。ガイスラー管の針金電極に 2~3 kV の高圧を接続しながら、注射器のピストンを引いて管内を減圧すると、放電が始まり発光が見られる。減圧のはじめは糸状の放電だが、十分に圧力が下がると、管全体が発光するようになる。この時、注射器を接続する前に、注射針 (注射器とセットになっている) を使って、空気以外のガス、例えば Ne や Ar ガスを導入しておくと、ガスの種類によって色が変わる。印象的なのはやはり赤く光る Ne だ。Ne は放電しやすく、電極間距離や印加電圧によっては、減圧する前から放電が始まる。

この実験では、高電圧をかけている部分に近いところを手でつかまねばならないのが懸念される。そのため、

Fig. 3 A handmade discharge tube (upper) and a whole setup of gas discharge experiment (lower).

電流量の小さな電源を使うとともに、結線の終端部に $5\text{ M}\Omega$ の抵抗を挿入している。我々はワニ口クリップでガイスラー管の針金電極に接続しているので、クリップの中に抵抗を仕込んでいる。が、これまでのところ、誤って高圧に触れた事例は皆無である。注射器を引いて減圧するのは、意外と力がある。そのため、小中学生の女子生徒には発光を見るのは、ちょっと難しい。しかし、真空ポンプではなく、自力で減圧して発光が始まるのを見るのは、印象的である。繰り返して試みるうちに、陽極部と陰極部で放電の様子が違うことに気づく、注意深い人も現れる。

さてここで減圧下での放電と発光という現象を持ってきたのは、電気ので、正確に言うと電子線衝撃で原子が壊れること、その時、励起状態の原子あるいはイオンから特有の波長の発光が起こることを、体験してもらうためだ。我々の研究所では、反応の励起にプラズマやレーザー照射、あるいは電子線衝撃がいたるところで活躍している（これは、最初の実験で、鉛の表面から酸化層をはぎ取り、活性な表面をむき出しにしたことに相当する）。また、原子や分子の同定に、LIF (Laser Induced Fluorescence) を始めとするスペクトロスコピーを多用している。このような反応励起やスペクトロスコピーの最も簡単な実例が、ここで紹介した実験である。その意味で、放電からの光を分光して、いくつかの孤立した発光線から成り立っていることを示せばもっと、理解が深まるかもしれない。

このデモ実験に基づき、原子の成り立ち、あるいは原子間の相互作用に電氣的な力が本質的な役割を果たしているということを説明している。そういう状況を本当の原子でなくとも、モデル原子、つまり鋼球を使って眺めてみようと言うのが次の企画である。

2.4 「モデル原子」を並べて結晶を作ろうー静電力による鋼球の凝集とレーザー回折

ボールベアリングの玉は高精度の球で、比較的安価で大量に入手できるので、いろいろなモデル実験に便利である。ここでは、箱の中に並べて2次元の結晶を作り、その構造をレーザー回折で見る実験と、静電気力で鋼球を集合させて2次元の「クーロン結晶」を作る実験を紹介する。

2次元の鋼球結晶を作る目的には、直径 0.5 mm のベアリング球を使った。後で、この結晶の構造を He-Ne レーザの回折で観察する目的には、この程度、小さな球を使う必要がある。ただし、直径が 1 mm を切ると、価格が急速に跳ね上がる (0.5 mm で1個¥2位)。これを、ちょうどこの鋼球が動き回れるだけの深さの、薄い透明な箱に入れて、適当に揺すっていると鋼球の結晶 (3角

Fig. 4 Two-dimensional polycrystals consisting of steel bearing balls of 0.5-mm diameter.

格子) が成長する (Fig. 4)。箱の内法が深すぎると、鋼球が重なってうまく2次元に並ばない。この箱は、透明なアクリル板 (厚さ 5 mm 、塩ビ板は剛性と透明度の両方に欠け、不適である) を 10 cm 角程度に切ったものを2枚用意し、鋼球と同じ厚さのスペーサ板 (2.2節で使った 0.5 mm 厚のアルミ板) をはさんで両面テープで張り合わせて作った。もちろん張り合わせるときに適当な数の鋼球を入れておく。両面テープは思いの外、厚さが均一で、このような 0.1 mm 精度の「精密加工」に耐える。この箱を光学実験用のアームに配置して OHP (Over head projector) の上に展示した。斜め下から He-Ne レーザを照射し、スクリーンにレーザーの回折スポットと同時に、OHP を使って実像を見せようという意図である。鋼球が規則正しく並んだ結晶部分よりも、レーザー光が空格子点や積層欠陥などの欠陥部分を捕らえたときの方が、特徴的な回折パターンが得られ、実像との比較で様々に楽しめる。

次の Fig. 5 の仕掛けで直径 1 mm の鋼球を静電的に集合させる。これは、透明電極2枚でギャップが 5 mm の平行平板のキャパシタを作り、その間に鋼球をはさんだ構造である。下面は全面が透明電極であるのに対し、上面は、中心付近の数 cm 径だけが電極にしてある。この構造を作る材料には、ネサガラスなどを塗布したガラス板が市販されている (例えば、フルウチ化学で 100 mm 角 10 枚、¥15,000) のが使える。透明導電層は、ワックスで覆って酸で溶かすと、望みの形状にできる。これを OHP に乗せ、鋼球の様子をスクリーンに映す。

上部の透明電極の電圧を掛けないときには、鋼球の位置はランダムで、全体を揺すると自由に動き回る、いわば気体状態である。ところが、 $1\sim 2\text{ kV}$ 程度の直流電圧を掛けると、上部電極が中心部にしかないので、それに引かれて鋼球が集まってくる。同時に鋼球も帯電するの

Fig. 5 Formation of Coulomb crystals assembling steel bearing balls by electrostatic forces.

で、静電反発でお互いには近づけない。結果として、鋼球はほぼ等間隔に並び、クーロン結晶（もどき、完全に規則的にはならない）になる。この結晶は、軽く揺すった位では融解しない。この状況は、実際の原子で起こっていることと良く似ている。適当な引力と斥力があれば、規則正しい構造がひとりでに作られ、方向性の力がない場合には、最密充填構造ができる。また、原子の並び方を観察するために、波の回折と干渉が有効であることは、本紙の読者には説明するまでもない。

正直に言うと、このモデル原子を使う実験は、同僚の研究者には大いに受けたものの、対照的に、一般の参加者にはあまり反響を呼ばなかったようである。やはり、モデル結晶のレーザ回折やクーロン結晶のおもしろさを感じ得るには、実際の原子を相手に苦労した経験が必要なのかもしれない。Fig. 5 で加える電圧を上げて行くと、鋼球が静電力で飛び上がる。鋼球が上部電極に触れたとたん荷電状態が反転し、逆に下向きに加速され、また下部電極で反転して、ということを繰り返して、ポップコーンを炒っているように鋼球が騒がしく飛び跳ねる。この方が一般受けしていたが、電圧を制御して物体の状態を変えるということを体験する目的には、それでも良かったかと思っている。

静電力にこだわるのは、筆者の携わっている研究に特有の理由がある。我々はイオントラップを使って、主に

Si のクラスターを成長し²⁾、固体表面に堆積する実験を行っている。つまり、イオンに対する静電力を物質操作に使っているわけである。公開用に交流 (50 Hz) を使うトラップを作り、発泡スチロールの小片やアルミナの粉を浮遊させて見せたが、本稿では省略する。

2.5 量子の世界にふれてみよう—電流の量子化

最後を締めるのが、導電体が極小さな点で接触しているポイントコンタクトで見られる電流の量子化である。これはご承知の通り、ミクロな世界や極低温での超伝導のような特殊な環境でしか現れないと、確か大学の講義で学んだはずのプランク定数 h が、通常状態での電気抵抗に手品のように姿を現す、研究者にとっても夢のような現象である。原子の世界の体験コースに、これを使わない手はない。

電流の量子化を観測するには、いろいろなやり方があり、極狭いチャネルを介して電流が流れる状況を作りさえすれば、ほとんどどんな場合でも見られることが知られている。最も簡単なのが2つの導体を近づけて接触し始める瞬間か、あるいは、接触させた導体を引き離して導通が断たれる瞬間である³⁻⁵⁾。この場合にはどこかの時点で、原子的なスケールで2つの導体がつながっている状況が出現するはずである。例えば2本の導線を軽く接触させて台の上に置き、それを紙相撲のようにとんとんと叩いて導線を振動させるだけでよい³⁾。

このような完全なあなた任せではなく、もう少し、自分の手でこの現象を制御しながら発現させている実感を味わってもらうために、筆者らは Fig. 6 のような道具を作った。これは、板バネの弾性変形を利用してマイクロメータの動きを縮小して $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の直線運動を作り、金線を金の箔にわずかに接触させて再び離すのが目的である。この弾性変形機構は一応、予定通りに働くが、実際には、支持支柱の強度が十分でないため、マイクロメータのつまみを指で押すと、この程度の変形が生じてしまう。そこでマイクロメータは実験前の位置調整に用いることにした。実際にポイントコンタクトを作るのに、

Fig. 6 Measurement setup of quantum point contact.

Fig. 7 Measurement circuit of quantum point contact (upper) and an example of record chart (lower).

見学者の方々にマイクロメータの尾部を軽く押し、導通が見られたら離すという操作をしてもらった。ポイントコンタクトを安定に作るために、いろいろな方法が提案されている⁴⁾。興味のある方には、様々なアイデアを思い描いて楽しい時を過ごすことをお勧めする。

測定回路は至って簡単で、Fig. 7 のように電池の電圧を抵抗で分割し、 $100\ \text{mV}$ 程度の電圧を測定端に加える。回路には $1\ \text{k}\Omega$ の抵抗が挿入してあり、その両端の電圧を液晶ディスプレイ付きのレコーダ (HIOKI 製 8804, ¥190,000) で記録することで電流を測定した。このレコーダにはトリガー機能があり、導通が始まった時点から、測定を開始できる。そこで、レコーダが測定を終了した後に記録を眺めてみて、導通の断続点を探すことができる。こうすると、図のように階段状に電流値が変化する結果が得られる。このレコーダには、感熱プリンタがついているので、希望者には測定結果をプリントして差し上げた。

さて、電流の量子化の原因を復習してみよう。電流の量子化とは、原子のスケールの狭い領域を電流が流れる時、コンダクタンスが

$$\text{コンダクタンス} = 1/(\text{電気抵抗}) = (2e^2/h) \times \text{整数}$$

と、プランク定数 h と電子の電荷 e で決まる定数 $1/(12.9\ \text{k}\Omega)$ の整数倍に、量子化される現象である。この原因は、原子のスケールのチャンネルを電子が流れる時には、量子効果により電子のとりうる状態の数が制限されるため、

$$\text{電流} = 2[\text{スピン多重度}] \times e[\text{電子の電荷}]$$

$$\times (e \times \text{電圧} / h \times \text{整数}) [\text{電流を運ぶ状態の数}]$$

となることに、基づく。これを直感的にわかりやすくどう説明するか、研究者にとって量子力学をどれだけ自分のものになっているかが問われる、腕の見せ所である。少なくとも我々の研究所に見学に来ようかという方の中では、量子力学とか電子のスピンという言葉を知っていて興味を抱いている人は、かなりの割合に上るらしい。知識のある方は、このような簡単な道具でミクロな現象が見えることに驚くとともに、量子力学が実際の研究内容や現在の技術動向にどう関わっているのかに関心を寄せられる。説明者の対応が良ければ、いろいろな議論が楽しめること、請け合いである。

3. おわりに

何と言っても、実験屋にとってすべて手作りの道具立てで、意外な結果がすぐに目に見えるというのは、最も知的好奇心をそそられる作業である。筆者がこの公開実験を準備していると、同僚に楽しそうですねと冷やかされもした。しかりである。本人が楽しんでいなければ、

人を楽しませることはできない。同様な試みをされている研究機関は多々あると思うが、ここで紹介した内容が少しでも参考になれば幸いだし、いろいろなアイデアや異なった視点をお持ちであれば、筆者にご教示下さるとありがたい。

文 献

1) ガリレオ工房・滝川洋二編著：“物理がおもしろ

い!!”(日本評論社, 1995) p. 199.

2) 金山敏彦, 宮崎剛英: 表面科学 **18**, 134 (1997).

3) J.L. Costa-Kramer, N. Garcia, P. Garcia-Mochales and P. A. Serena: *Surf. Sci.* **342**, L 1144 (1995).

4) J.M. van Ruitenbeek, A. Alvarez, I. Pineyro, C. Grahmann, P. Joyez, M.H. Devoret, D. Esteve and C. Urbina: *Rev. Sci. Instrum.* **67**, 108 (1996).

5) U. Landman, W.D. Luedtke, B.E. Salisbury and R.L. Whetten: *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1362 (1996).