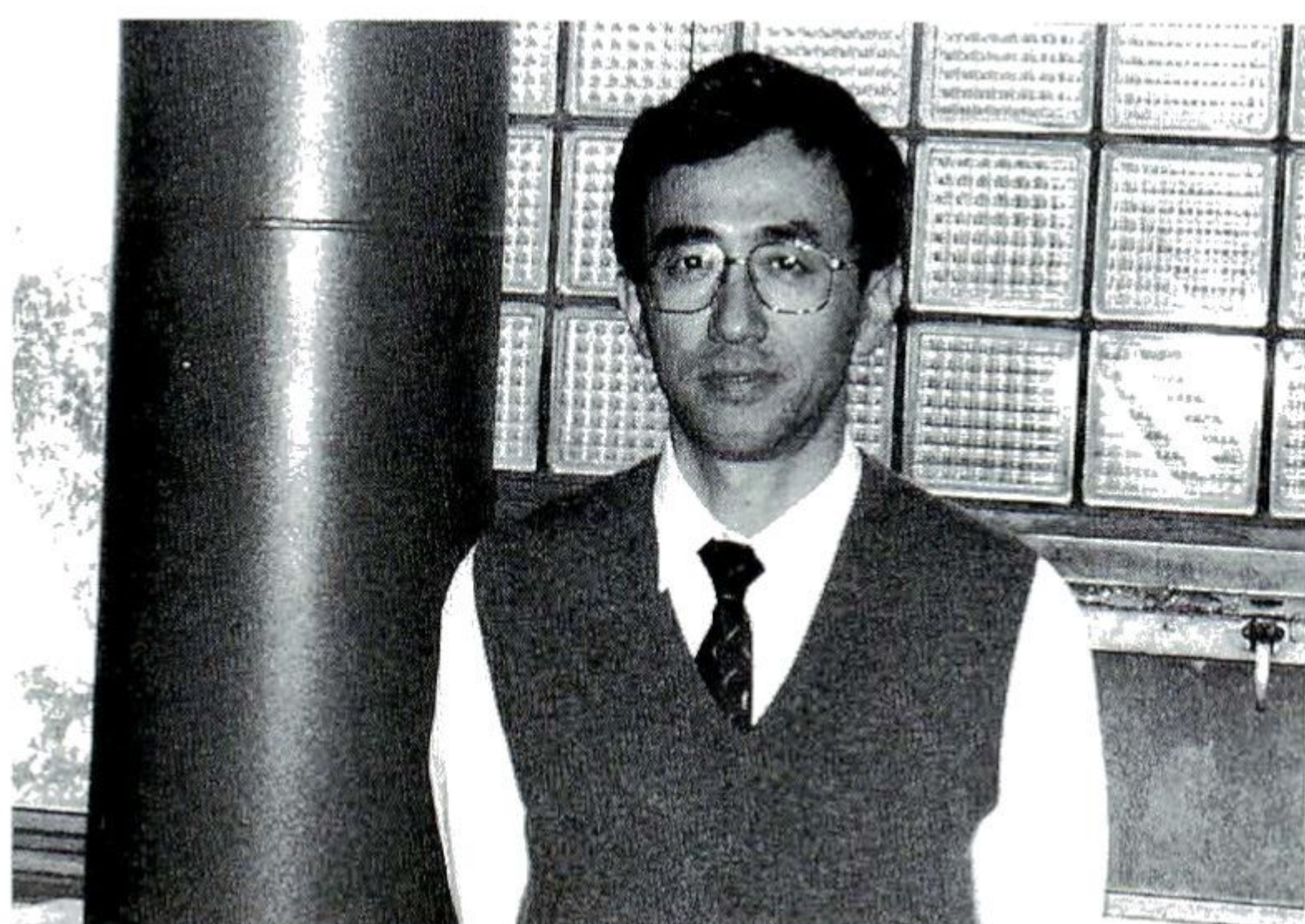




超流動を利用して顕微鏡をつくる

——奥田研究室～応用物理学科——



奥田 雄一 教授

(左は超流動ヘリウム超音波顕微鏡)

「超流動」という言葉を聞いたことがあるだろうか？超伝導はよく耳にするのに対して、超流動となると聞いたこともないという人が多い。なぜなら超流動は、超伝導に比べるとほとんど利用されていないからだ。知らない人がいても無理はないだろう。

さて、ここ応用物理学科・奥田研究室では、この超流動という現象を利用して、画期的な顕微鏡を作ろうとしている。「超流動ヘリウム超音波顕微鏡」である。超流動だけでもなじみがないというのに「超音波顕微鏡」とは一体なんだろうか。



音波の顕微鏡は「耳で見る」？

まず、音波を使った顕微鏡とは一体どんなものなのかという話から始めなければならない。光学顕微鏡や電子顕微鏡はすでによく知られているものだが、これらは試料の中まで見ることはできない。しかし、音波を使った顕微鏡では試料の中まで見えるのだ。写真1を見ると、超音波顕微鏡の特長が見事に表れているのがわかる。ICチップの表面だけでなくチップの中までもまるで透けたように写し出されているのである。同じものを電子顕微鏡で見た写真2と見比べるとその違いがわかるだろう。確かに、光や電子は物質に当たればさえぎられるのだから物質の中まで見ることは原理的に不可能である。ところが音波は物質の中でも伝わる。閉め切った部屋の中にも隣の部屋の話し声が聞こえることから明らかだ。物質の中まで伝わるということから、音波を使った顕微鏡の利点というものがおのずと見えてくるであろう。光学顕微鏡や電子顕微鏡では試料の表面にしかピントを合わせる(光や電子を収束させる)ことができない。だが音波を使えば、試料の表面だけでなく試料の中にまでピントを合わせられるのである。

そこで、試料に向かって音波のパルスを発射する。反射してきたパルスを解析すると、焦点を合わせた部分の性質がわかる。ここで発振器を縦横に動かしていけば、その試料を音波で見た「画像」を構成することができる。これが音波を使った顕微鏡の原理だ(図)。

このような顕微鏡が実際に利用されることとして考えられるのは、たとえば材料評価である。材料の中にできた、表面からは見えない細かな亀裂が見えるし、反射してきた音波の位相や振幅を調べることによってその部分の硬さもわかるからで

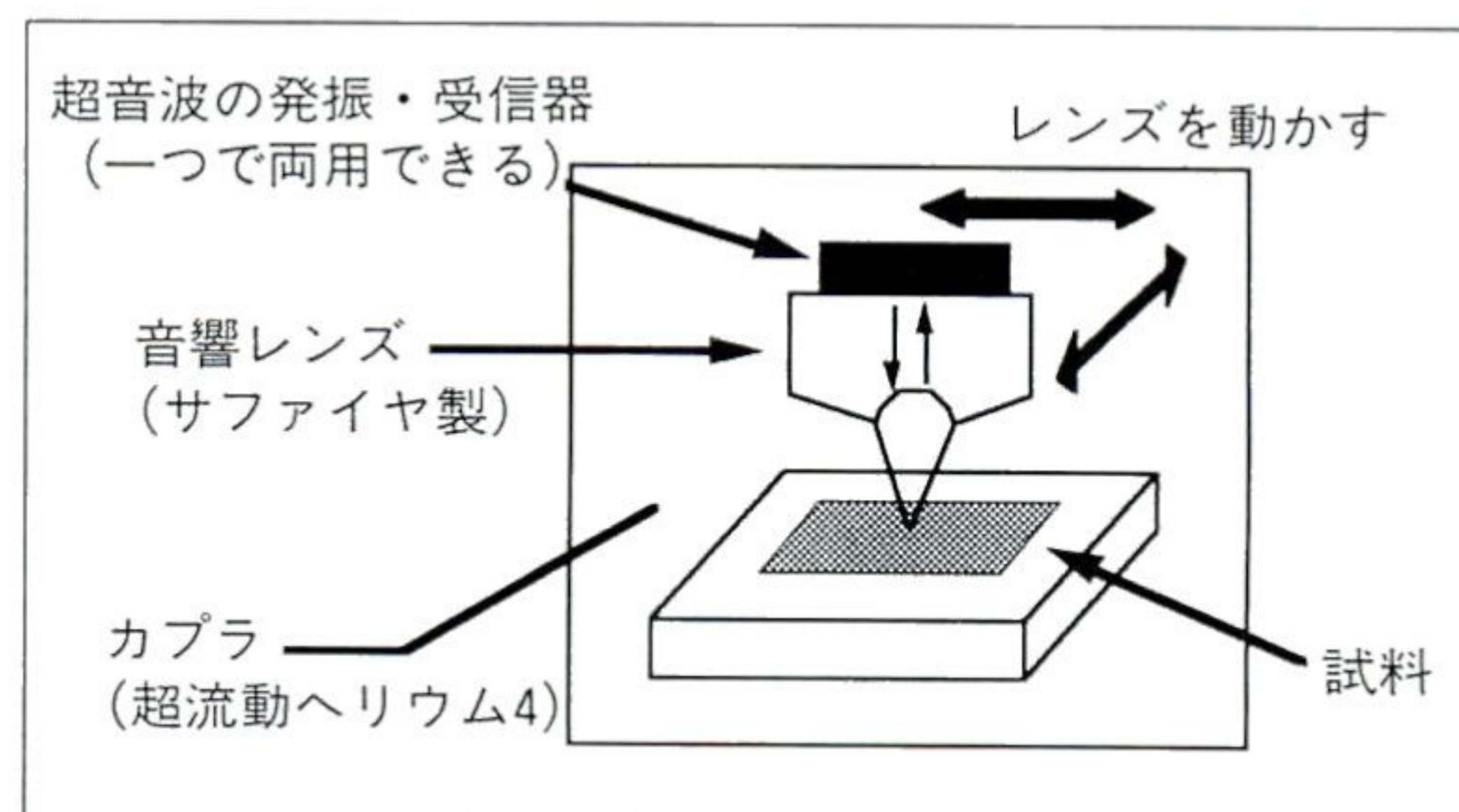


図 超流動ヘリウム超音波顕微鏡の原理

ある。

ところで、材料のなるべく細かい部分まで見るためには、どうすればよいだろうか？「見ることのできる最小の細かさ」を分解能というが、この分解能をもっと高くするためには、どんなことが必要だろうか？光を用いるときにも、より細かいものを見るためには波長を短くしなければならない。なぜなら大きな波長の光で細かいものを見ようとしても、回折が起こって像がぼやけてしまうからだ。音波も波動だからこの状況は変わらない。顕微鏡に用いる音波の波長が短ければ短いほど分解能は高くなる。高校で習った波動に関する式、 $v=f\lambda$ を思い出してほしい。音速 v を一定とすれば、波長 λ を小さくするためには、振動数 f を大きくしなければならない。つまり顕微鏡の分解能を高くするためには、振動数を大きくすればよいのである。そして顕微鏡に使えるほど波長を小さくすると必然的に振動数は人が聞き取れる範囲をはるかに越えてしまう。だから顕微鏡に使う音波は超音波ということになる。ところが現在の超音波顕微鏡は、この振動数を大きくするという所で足踏みしているのである。

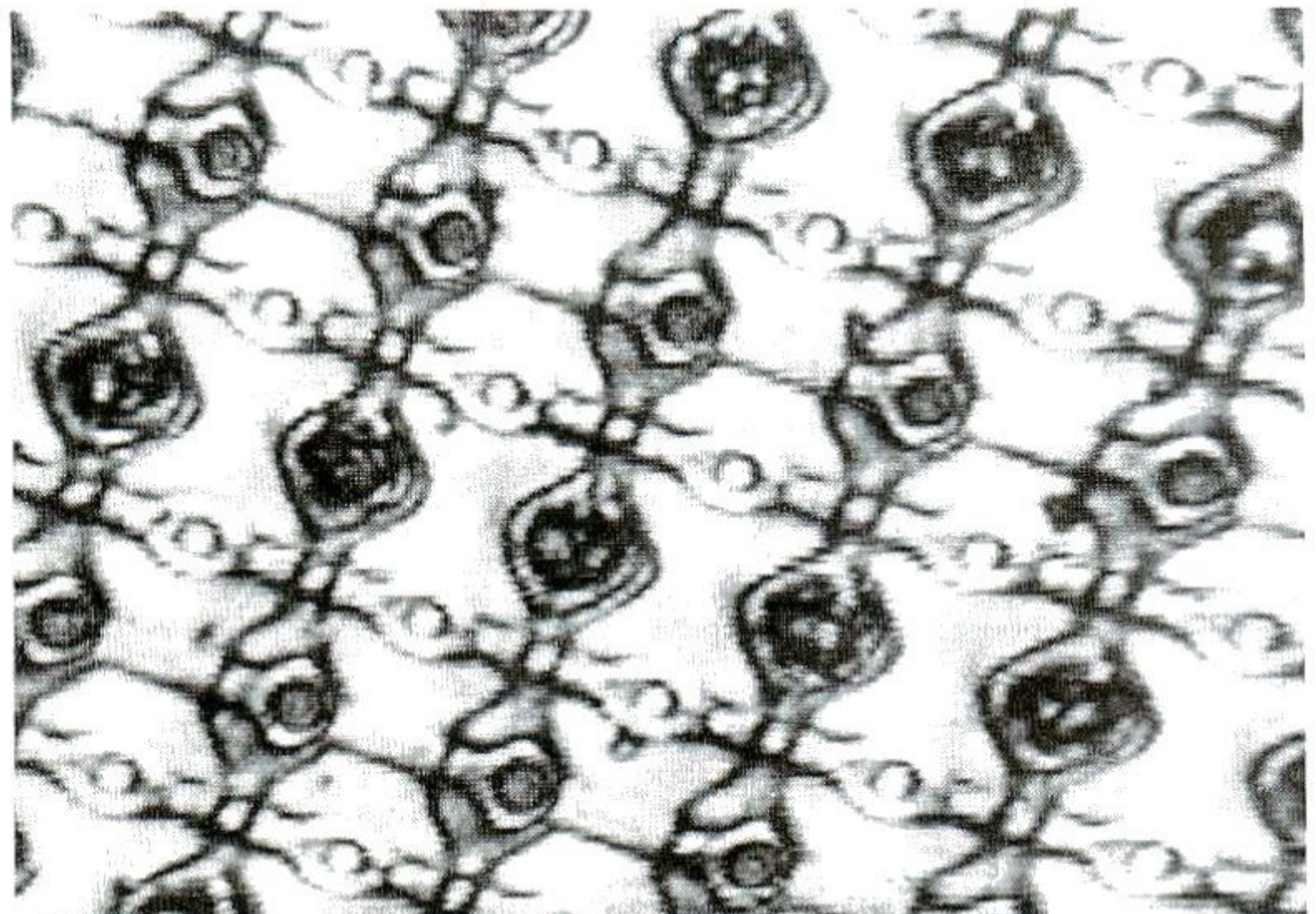


写真1 超流動ヘリウム超音波顕微鏡で見たICチップ

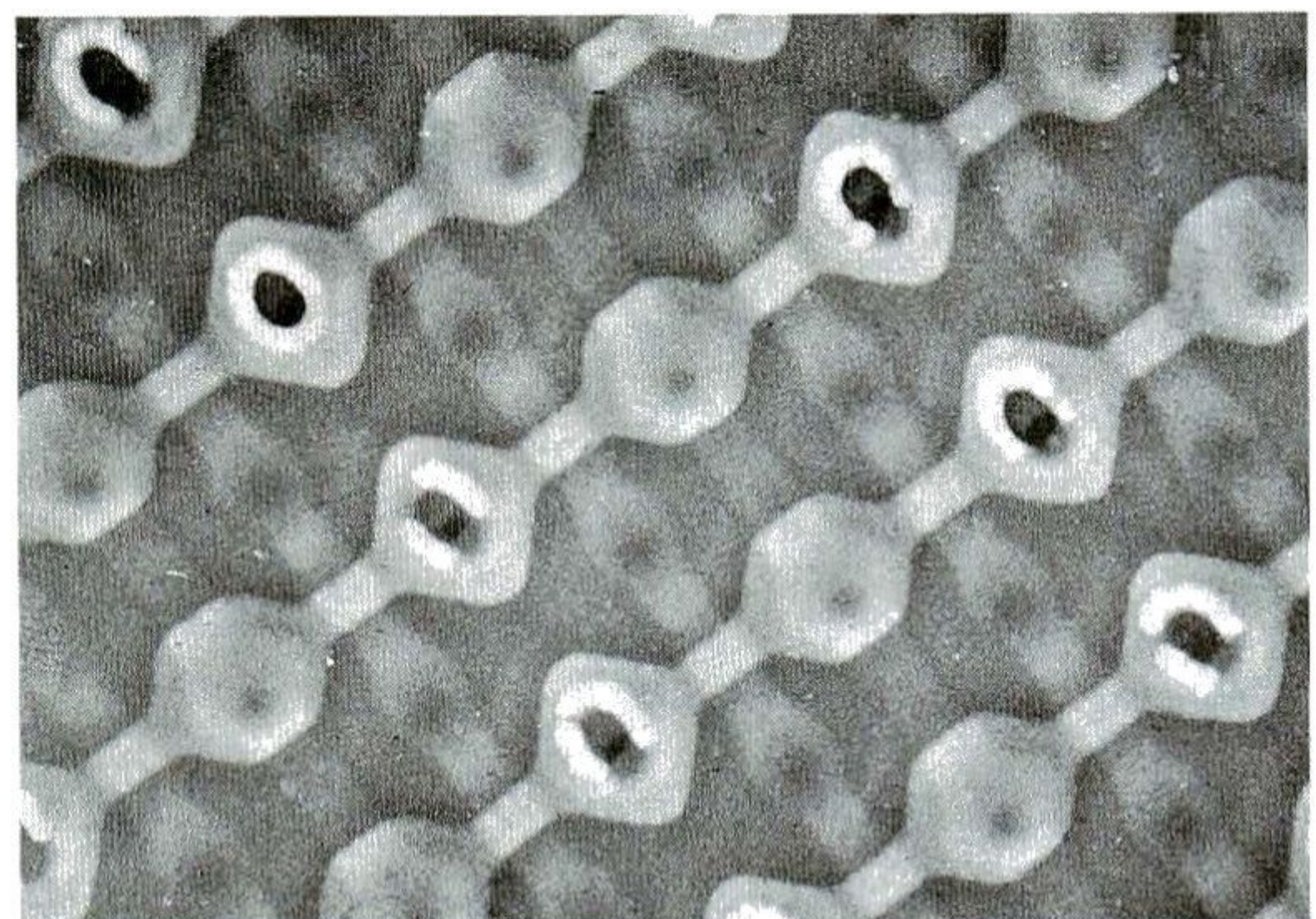


写真2 同じものを電子顕微鏡で見た場合



超流動ヘリウム、あらわる

音波の反射をとらえるといっても、ただ超音波の発振器と受信器を直接試料に押しつけるだけではダメである。試料に超音波を均一に入射させるために、なんらかの媒質に一度超音波を通してやる必要があるのだ。現在市販されている超音波顕微鏡は、この媒質(カプラという)に水が使用されている。具体的には試料を水につけておき、その水の中に超音波を発射するわけだ。この顕微鏡によって、先程と同じものを見たのが写真3である。ところが、この水に問題があった。ふつう液体には粘性というものがある。どろどろした沼地では大きなうねりはできるが細かなさざ波(振動数が大きい波)は立たない。顕微鏡のカプラとしての水にも、ミクロな視点から見れば沼と同じようなことが起こる。あまりに振動数が大きい波を発射すると、すぐに吸収されてしまうのだ。こうなると、もはや顕微鏡として使い物にならない。水の場合、この限界の振動数がせいぜい1GHzで、そのときの波長は1.5ミクロンである。この1.5ミクロン

という長さが、水を使った超音波顕微鏡の分解能の限界ということになる。顕微鏡の分解能を高く、つまり振動数を大きくしようとするときに、この水の粘性という問題が大きく立ちはだかってくるのだ。

ここでやっと「超流動ヘリウム超音波顕微鏡」が登場する。これはカプラとして水ではなく超流動現象を起こしているヘリウム4という液体を使用する超音波顕微鏡である。さて、この超流動とは



写真3 水を用いた超音波顕微鏡で見た場合

いったいどんな現象なのだろうか。

超流動とは絶対零度に近い液体ヘリウムだけにおこる珍しい現象のひとつで、一言でいってしまえば「粘性がなくなる現象」ということになる。超流動のしめす特異な現象は他にもいろいろあるが、ここではこれ以上詳しくは述べない。さて、この粘性のない液体を超音波顕微鏡のカプラとして使ったらどうだろう。粘性がないのだから、いくらでも振動数を大きくすることができる。そうすれば、いくらでも分解能を高くできるではないか。実際には超流動ヘリウムといえども、わずかながら音

波の吸収があるので無限に振動数を大きくすることはできない。しかし、カプラとして水を使った場合よりも、格段に振動数を大きくすることができそうである。しかも超流動ヘリウムの中では音速が水に比べるとはるかに小さい。先ほどの式 $v=f\lambda$ をみると、同じ振動数でも音速 v が小さい方が波長 λ も小さくなることがわかるだろう。そのためさらに分解能は高くなることがわかる。超音波顕微鏡にとって超流動ヘリウムを利用することは、粘性がなくなる、音速が小さくなるという2つがこの上ない利点となるのだ。



超流動はわからないことだらけ

超流動ヘリウムには今述べたような利点があるのでぜひとも超音波顕微鏡に応用したい。この結果「超流動ヘリウム超音波顕微鏡」が作られた。ところが、超流動はすぐに実用化できるほど単純な現象ではなかったのである。

なるべく強い超音波(振幅の大きい超音波)を入れた方が、反射してくる超音波も強くなるので観測がしやすい。しかし、超流動ヘリウムに限らずどんな液体をカプラにしても、ある一定の強さ以上のパルスを入れると、反射してくるパルスはもうそれ以上強くならず一定になる。これを「飽和」という。飽和した際の余分なエネルギーはどこへ行くのかというと、振動数の異なる音波としてあらわれる。飽和していないときには、 f という振動数の音波を入射すれば同じ振動数 f の音波が反射してくる。ところが、飽和に達すると振動数が $2f, 3f\cdots$ と整数倍になった音波が返ってくるのである。一般に、振動数が基本波の整数倍になっている波のことを「高調波」と呼ぶ。

この高調波が、超音波顕微鏡の試料付近で発生するとどうなるのだろうか。写真4は半導体のチップを超流動ヘリウム超音波顕微鏡で見たものである。この2つを見比べると、飽和して高調波が出ているとき(a)の方が明らかに鮮明であることがわかるだろう。高調波が発生すると分解能が高くなるのである。ここで、先ほどの話を思い出してほしい。振動数は大きい方が波長が短くなって分解能が高くなる。ところが、高調波の持っている情報を画像として利用するのは実に困難であるということがわかった。高調波によってもたらされ

る分解能の高い画像はなるべく利用したいところだ。しかし高調波が発生し、それが超流動ヘリウム中を伝わってくるメカニズムはかなり複雑なものである。水のように粘性のある、いわゆる「ふつうの」流体の場合なら、この高調波が伝わるというメカニズムはすでに解明されている。だが超流動ヘリウム中での高調波のふるまいには、まだまだ解明されていないことが多く、音波が返ってくるまでの間にはかなり複雑な過程が存在すると考えられている。奥田先生がいま研究なさっているのはまさにこの過程である。このメカニズムを理解しなければ、返ってきたパルスを調べても試料がどのようなものなのかという結論を出せないからだ。写真4はa, bともに反射して返ってきた超音波パルスの振幅にしたがって単に色付けしたものにすぎない。高調波のふるまいがわかっていない以上、この写真を見てもそこから試料の構造を決定することができないのである。奥田先生はいま、すでに構造のよくわかっている試料を超音波顕微鏡で観察して、それがどう見えるのかを調べてから高調波のメカニズムを明らかにしようとなさっている。

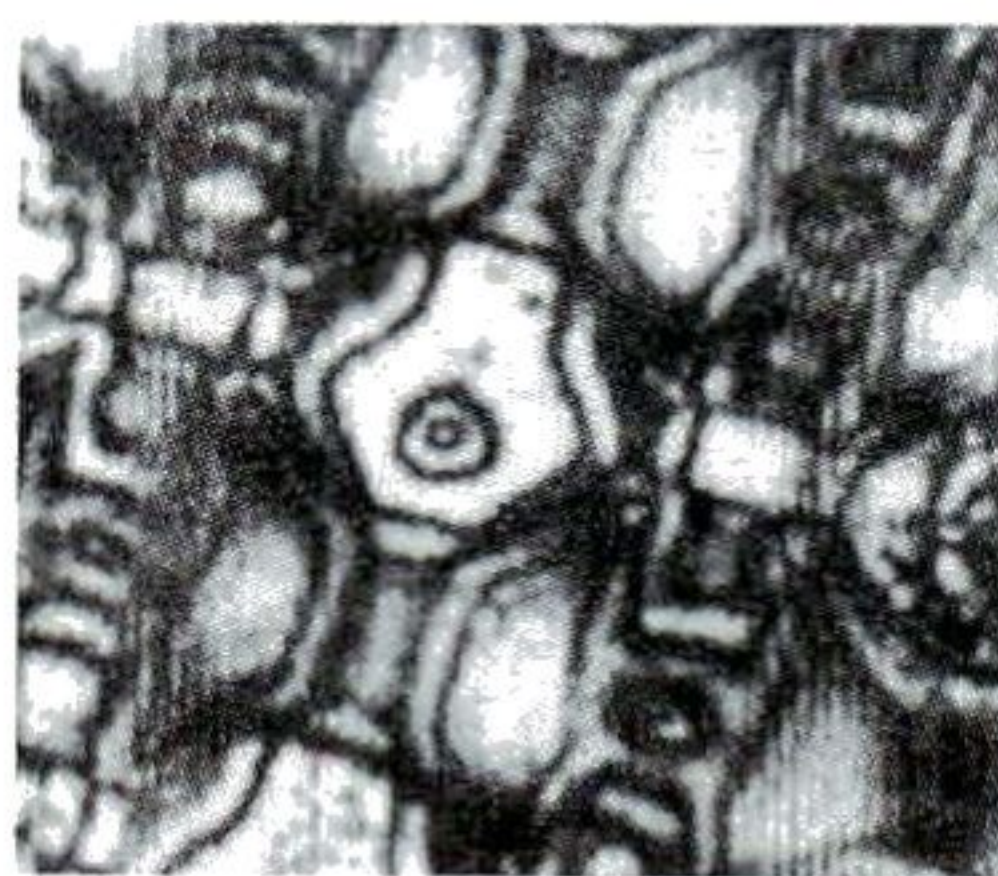


写真4 高調波が出ている(a)

出ていない(b)



超流動ヘリウム顕微鏡のこれから

超流動はラムダ点と呼ばれる 2.197 K (-271°C) 以下で起こる。しかし、超音波顕微鏡として利用するには、さらにそれより一桁ほど低い 0.3 K ぐらいにまで温度を下げなければならない。これほど温度を下げると、いろいろと難しい問題がおこってくる。現在、奥田研究室にある装置では、試料をセットして常温からこの温度までヘリウムを冷やすのに2日間かかるという。別の試料を見たいと思ったら、その試料を顕微鏡にセットしてまた2日間待たなければいけないのだ。また、顕微鏡の画像を得るためには超音波発振器を縦横に動かし、さらに試料に近づけたり遠ざけたりして焦点を合わせなくてはならないが、このように低温で精密な動きをする駆動部分を作るのは大変難しいという。これほどの低温になると、駆動部分に縮みが生じてしまうからである。

まだ実用までにはいろいろと解決すべき課題のある超流動ヘリウム超音波顕微鏡だが、これが完成すれば素晴らしいものになるにちがいない。奥田先生の話によると、究極的には超音波の振動数は 100 GHz にまで上げられる見込みがあるという。こうなると分解能は 24 \AA という恐ろしい値になる。最近の非常に微細な構造をもっている、半導体素子の歪みなどがとらえられるようになるのだ。この顕微鏡では試料がつかっているカプラは化学的に不活性な液体ヘリウムなので、生体試料など壊れやすい物もそのまま見ることができる。

このようにユニークな超流動ヘリウム超音波顕微鏡だが、奥田先生はなぜこのような研究をする



ようになったのだろうか。奥田先生は以前から超流動などの低温物理学を研究なさっていた。超流動という現象は確かに純粋な学問としては非常に魅力的でありそれなりに研究がされてきている。しかしながら、実際に応用されることはほとんどなかった。使いみちがなかったからである。超流動と同じく低温で起こる奇妙な現象には超伝導があるが、こちらの方は現在盛んに利用されているのはご存じであろう。それにひきかえ超流動の方は、実際に応用されていないため知名度が低い。奥田先生は自分の研究分野である超流動をこの超音波顕微鏡に応用しようと考えたのである。基礎研究だけされてきたものが、実際に応用されていく。このような例は非常に稀なのだそうだ。「私のそもそもの出身は低温物理なんです。超流動、超伝導という世界の間人なんですが、やっぱり基礎研究でも何かに応用できたらいいと思っていましたね。基礎研究と応用、この2つが結びつくというのが科学としてほんま理想ですよ」と奥田先生は言われた。

これからこの超流動を応用した超音波顕微鏡がどう活躍していくのか、楽しみなところだ。

奥田先生に今の東工大生について一言、とうかがうと、先生は「そうですねえ、まあいろいろ言いたいことはあるんですけど…」としばらく考えてから、こう言われた。「東工大生というのは非常によくできる人が多いんですが、非常にスケールがこう、こじんまりとしている人が多いように思いますね。大学生というのは、いままでの何かを学ぶという立場から、自分で何かをするという立場へ移行するという時期なんです。でもなかなか、お勉強はよくできても、この移行がうまくい

かない人が多いみたいですね。ほんとマトモで、型破りがあんまりいないんですよ。でもサイエンスに対するセンスは非常にいいものを持っているので私たちとしても、それをもっと大きく育てるような努力をしたいし、学生さんたちにももっと大きく飛躍できるようなものがあっていいと思いますね、東工大は」

最後に、快く取材に応じて下さった奥田先生に感謝します。ありがとうございました。

(新山 祐介)