



Title	原子・空孔・不純物原子・結晶表面原子を見ること
Author(s)	橋本, 初次郎
Citation	大阪大学低温センターだより. 1982, 38, p. 1-4
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/4121
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

原子・空孔・不純物原子・結晶表面原子をみること

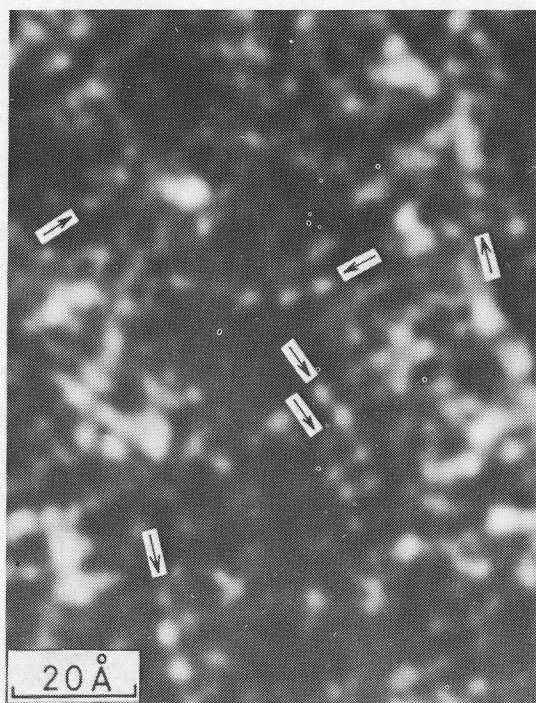
工学部 橋 本 初次郎 (吹田 4657)

単原子をみること

原子の大きさは直径 $2\sim 3\text{ \AA}$ であるから電子顕微鏡の分解能が 2 \AA 位になれば、原子や、空孔や、不純物原子をすぐにもみる事ができるように思われるが、物を見るには分解能だけがすべてでない。闇夜にカラス、雪上の白兔のたとえの如くコントラストがつかぬと分解能が充分あってもみえない。逆にコントラストがあれば、大望遠鏡でも点にしかみえぬ星が肉眼でもみえる。見るためには、コントラストを如何に高めるかが重大な問題となる。原子の内部はすでによく知られているように 10^{-5} \AA 位の大きさの核と電子で構成されている。ピンポン玉を1億倍すると月の大きさになるが、原子はこの倍率でやっとピンポン玉の大きさになり、この時核と電子は $0.1\text{ }\mu$ 位のウイルスの大きさになる。原子の中は殆んど物質(せまい意味)のない空間である。しかし核と電子でできた電位場があるので、これを電子で照明すると、この電位場へ入り込んだ電子は進行方向をまげられる。(屈折、散乱)だけで殆んどすべて出てしまう。丁度透明な結晶球に光をあてたようなもので、レンズでこれを写すときピントを合わせるとコントラストは消えてしまう。ピントを少しずらして、透過波の位相のずれにもとづくコントラスト(位相コントラスト)をつけると重い原子の場合は10数パーセント位のコントラストになり、やっとみえる位になる。しかし原子を支持する膜のノイズがこれより小さくないといけなないので単原子の像をみるのは仲々大変で、軽い原子ともなると1個をみることはまだできない。しかし日没後、宵の明星をみるように側面より照明して、散乱電子のみで像を作り背景をくらくするとコントラストは重い原子で30パーセント位になり充分よくみえるが散乱電子の強度が弱いので撮影の露出時間を10倍位増さないといけない。その間(20秒 \sim 30秒)像がぶれない様にする工夫が必要で、 1 \AA の試料の移動があってもいい像が得られない。図1はトリウムを紐状に含んだ高分子(ピロメリテート)が観察中分解し結晶してできた酸化トリウムの結晶である。白く光るのはトリウム原子で酸素はコントラストが低くてみえない。

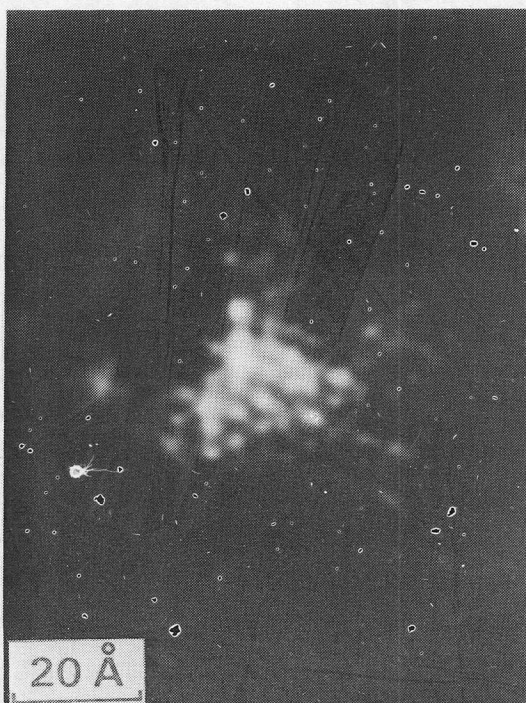
結晶内原子をみること

結晶内では多数の原子が規則正しく重り合っているので、各原子で散乱される電子は干渉し合ってブラッグ反射し図2(a)の如き電子回折像を作る。この電子回折波が結晶構造の情報をもっているのをレンズで集めて像を作れば結晶内原子の像がうつしうることになる。現在最もうまく作られた電子レンズでも収差をもっているのを、これを除くために小さな絞りを入れるため図2(a)にaとかbの円で示した範囲の回折ビームで像を作ることになる。図2(b)はそのようにして写した、 100 \AA の厚さをもつ金の格子像で面心立方格子の $[110]$ 方向から写したもので原子が規則正しくならんでいるのがみえる。中央部付近に積層欠陥があり面心立方格子のABC、ABCの積層のうちB層が一枚ぬけた欠陥になっているのがわかる。白く光る点が原子のある位置でその強度はほぼ同じ強さをもっている。結晶内で多



(a)

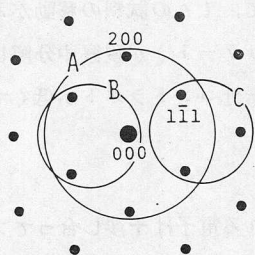
トリウムピロメリテート内のトリウム原子



(b)

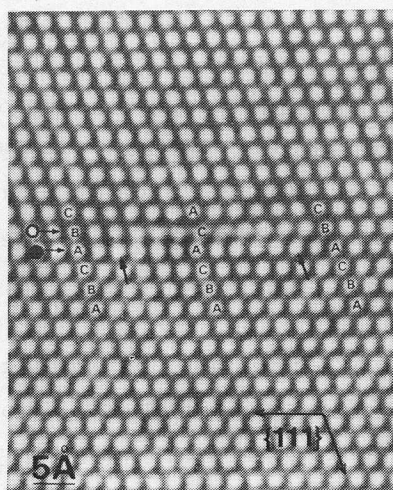
酸化トリウム微結晶内のトリウム原子

図 1.



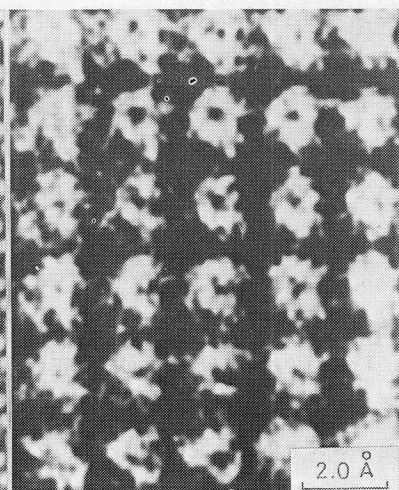
(a)

金の110方位の電子
回折像とレンズ絞りの
位置



(b)

金の110方位の原子格子像、
中央に積層欠陥を含む



(c)

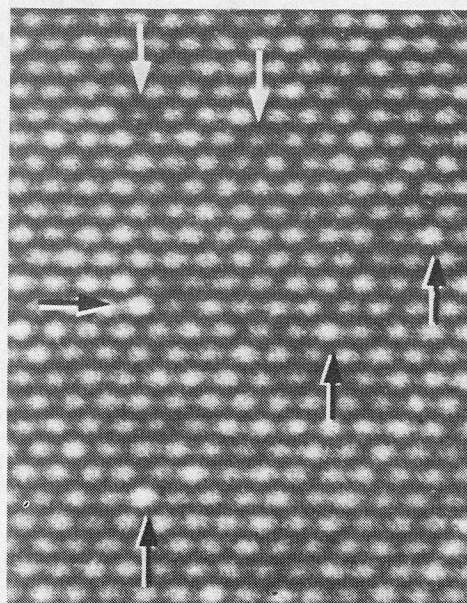
金の100方位の高分解能
格子内原子像の微細構造

図 2.

重散乱をした電子が干渉し合って、電子が原子列に沿って流れるために原子位置が明るく現れるのであるが、大きな角度に散乱される回折像を結像にとり込むと、電子の流れの微細構造が現れることになる。原子に所属する電子は核のまわりの制限された領域に存在することはよく知られているが、この外から入射した電子も原子列に沿って流れるとき、特別に制限された領域のみを通して流れることになる。レンズに工夫をして回折斑点の2次の反射波も入れて結像させると図2(c)の如く、原子の像に微細構造ができる。これは上に述べた如く結晶内に外から入り込んだ電子が原子列内の制限された所を通して出て来たために生じた像である。

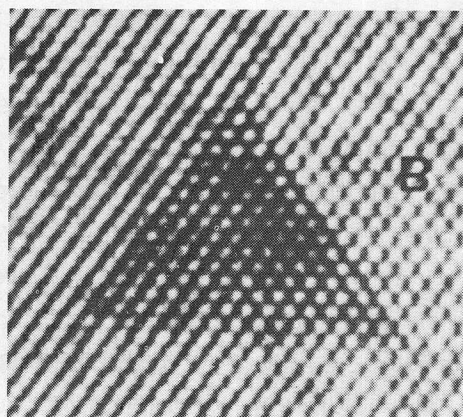
結晶内原子空孔不純物原子をみること

図3は図2(b)の如き金の結晶膜に2.5 MeVの電子を照射したとき、高エネルギー電子で格子内原子がはじきとばされ、生じた空孔が集って図2

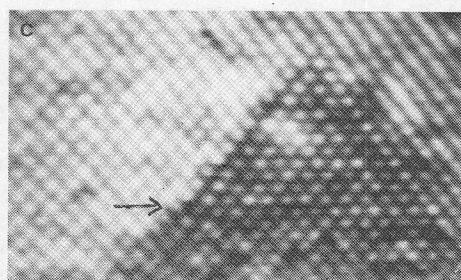


Sbを含んだSi, 黒い矢印の先にあるのがSb原子と見做される。白矢印の先にあるのは原子空孔と見做される。

図 4.



(a)



(b)

2.5 MeV 電子で照射した時生じた積層欠陥四面体, (b)の矢印は積層欠陥内に原子ステップがあることを示し黒い領域にある原子は白黒のコントラスト異常を示す。

図 3.

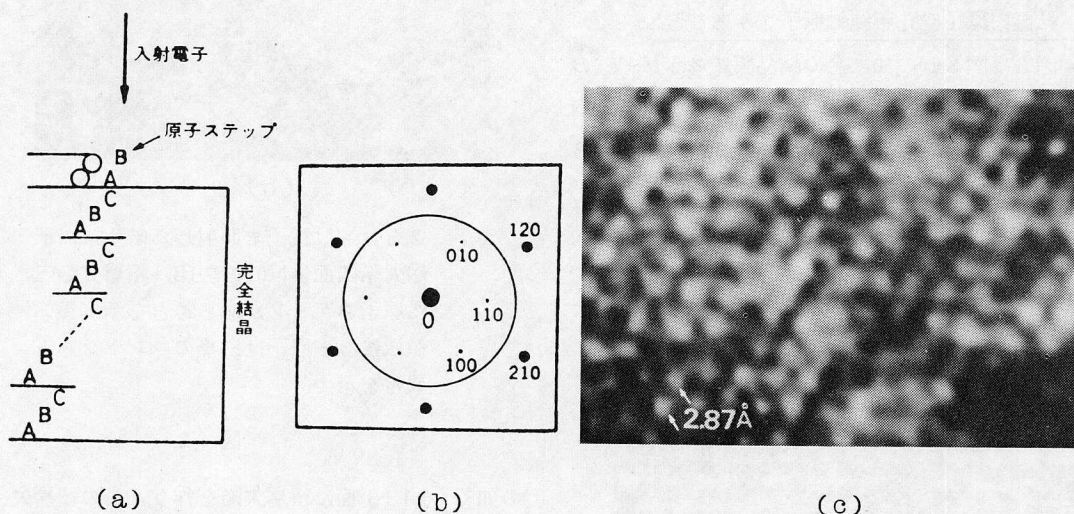
(b)の如く(111)面に積層欠陥を作り、この積層欠陥面が正四面体を作ったもので三角形のコントラストを示す。(a)図はかなりはっきりした縁をもっているが、(b)は縁に階段があったり、内部にコントラストの弱い点があるのが矢印の所にみえる。これは原子空孔によるものと見做され、電子回折動力学理論と結像理論よりの計算結果とも一致している。

図4はSbを含んだSi薄膜の像である。Siに較べSbは電子散乱能が大きく、大きな角度に電子を散乱する。そこで入射電子がビームを傾け図2(a)の中にCの円で示した中心斑点0に対して大きな角度で散乱されたビームのみを用いて像を作るとSi

原子は弱く Sb 原子はコントラストが強くうつるはずである。その様にして撮影した図 4 にみえる矢印で示した強い点は Sb 原子によるものと思われる。電子を照射しながら連続観察するとこの強度が変わるのがわかる。これは Sb 原子が移動しているためであると考えられる。

結晶表面の単原子層の原子像をみること

図 5 の(a)は面心立方格子の(111)を表面にもつ結晶の断面図である。この面は六方稠密の原子が図 2 (b)に示した如く ABC ABC と積上っている。結晶表面が C 原子で覆われると完全結晶となるので(b)に示した回折像の強い斑点のみとなる。もし表面に更に A 原子層又は B 原子層が積上るとこの層からの弱い回折斑点が強斑点の内側に生じる。そこで小絞りをういこの回折斑点のみをレンズに入れて像を作るとのようにすると A 層の原子又は B 層の原子の像が撮影できる。像の強度が極めて弱く、強い斑点で撮影する場合の露出(2 秒)の 20 倍位が必要となるので図 1 の撮影の如く極めて高性能の電頭が要求される。図 5 (c)はそのようにしてうつした金の 111 表面の像である。コントラスト計算より何の表面原子が夫々 A, B, C, の位置にあるかをきめることが可能である。表面反射電子回折, オージェ電子分光イオンマイクロアナライザーなどと併用することができれば表面物性を原子レベルで観測できることになる。



面心立方格子の表面にある単原子層のモデル(a), その回折像(b), 表面原子層のみより出る回折斑点を用いて作った原子格子像。白, 黒の領域は, 一層, 二層, 完全結晶の領域に対応するコントラスト。

図 5

あとがき

試料を低温にして上記の観察が行えれば原子や欠陥の挙動についての詳細な研究ができるのであるが、極めてわずかの振動($\sim 1 \text{ \AA}$)も許されないのが、現在はまだ試料も冷却して原子レベルの観察を行なうことはできない。対物レンズも一緒に冷却して超電導レンズとして使用する方法がこれを可能にすると思われる。低温センターの協力でこのような装置ができれば、原子直視法による物性研究は格段の飛躍をすることは必至である。