

次世代超電子顕微鏡の開発

特集 プロジェクト研究

志 水 隆 一*

Development of Next Generation Super Electron Microscope

Key Words : Electron Microscope, Aberration Free Observation Phase Image, Active Defocus Image Modulation, High Resolution

1. はじめに

電子顕微鏡が発明されて半世紀が経ちました。いまや、原子レベルでの評価技術として確固たる位置を占めていることは周知の通りです。しかし、その基本的な性能については、電子顕微鏡は未だその誕生以来背負ってきたハンディキャップを解決できないまま現在に至っているのです。それは球面収差が除去できないことと位相像のみを抽出して観察することが出来ないことです。御承知のように光学顕微鏡においては、凹レンズとの組み合わせによって球面収差は除去されていますし、位相差顕微鏡によって位相像のみを容易に観察することが出来ます。電子顕微鏡には凹レンズも位相板も実現していないのです。

この為、たとえば原子配列の観察には必ず球面収差によってもたらされる偽像がかぶってきて正確な原子位置の観察が出来ませんし、生体観察においては重金属浸漬による染色を施すことによってその陰影像を観察してきたのです。

ところが、1985年に生田孝大阪電通大教授(阪大工1970年卒)によって発明された能動型結像変調法は、球面収差を除去して位相像あるいは振幅像を抽出して観察することの出来る画期的方法です。私共

は直ちに生田教授と共同研究を開始し、この能動型結像変調方式を組み込んだ電子顕微鏡の開発に取り組みました。そしてようやく1993年に既存の電子顕微鏡を改造して試作した能動型結像変調電子顕微鏡(Defocus Image Modulation Processing Electron Microscope - DIMP-EM)による無収差原子像の観察に成功しました。

ここで御紹介する研究プロジェクトは、私共が進めてきた上記の研究成果を基にして、平成8年度に開始された日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業に申請して、研究プロジェクトとして採択されたものです。

この電子顕微鏡が完成されますと、今までの電子顕微鏡と同様に実時間で観察できます。そして、その観察像は球面収差の影響の全くない正しい像が原子レベルで観察できるようになります。たとえば、表面を形成している原子がどのように並んでいるのか、原子一つ一つをはっきりと観察してその位置を正確に知ることが出来ますから、例えば触媒反応に表面電子状態がどのようにかかわっているのかを理解する上で、貴重な知見を与えてくれるでしょう。染色してからでないと観察できなかった生体試料なども無染色のままきれいな像を見ることが出来るようになるのです。長年の夢であったヴィールスなどの微細構造が明らかになるのも間近いことでしょう。このようにこのプロジェクトによってさまざまな材料や生体がどのように構成されているかが原子レベルで解明されることになるでしょう。

2. 研究の目的

我が国で発明、開発された能動型結像変調電子顕微鏡を、さらに実用化を目指して実時間処理が可能な装置化を実現することにより、世界初の超解像位



*Ryuichi SHIMIZU
1937年1月2日生
昭和34年大阪大学工学部精密工学科卒業
現在、大阪大学大学院・工学研究科・
応用物理学専攻、教授、工博、応用物
性学
TEL 06-6879-7841
FAX 06-6879-7843
E-Mail shimizu@ap.eng.osaka-u.
ac.jp

相差電子顕微鏡—次世代超電子顕微鏡—を開発することが本プロジェクトの研究目的です。これは①超解像無収差電子顕微鏡観察(空間分解能1 Å以下)を可能にするのみならず、従来の電子顕微鏡では不可能であった、②位相像と振幅像の分離抽出観察を可能にし、③生体の無染色位相像直接観察への道を拓くもので、今までの電子顕微鏡の概念を全く一新する、文字通りの次世代の超電子顕微鏡です。

3. 研究の内容

実時間処理の能動型結像変調を行うためには、電子顕微鏡の結像光学系の特性を正確に写し取った変調信号を高電圧加速電源(200kV)に重畳させねばなりません。そのうえ、次々に変わっていく加速電圧の下で得られる電子顕微鏡写真を一枚一枚重ね合わせるにより最終的に一枚の電子顕微鏡写真を得ます。この一枚の写真が、無収差超解像電子顕微鏡写真なのです。このような新しい電子顕微鏡のシステムを作り上げるために次のような研究を進めてきました。

(1) 能動型加速電圧変調システム

実時間で観察するためには、10マイクロ秒ごとに正確に高圧加速電圧を変調しなければなりません。このために、高電圧電源の上に高速高精度変調電源を積み重ねる浮遊型高電圧変調方式を開発いたしました。これは、特許として申請公開されています。

(2) 演算機能を持つCCDカメラ

高電圧の加速電圧が変調される毎に像を撮り、交互に足し算と引き算を数十回繰り返すことで無収差像が得られます。これも実時間で像観察をするために数十マイクロ秒以内で画像の演算をする必要があります。このため、画素毎に高速演算を行える新しいCCD撮影素子を試作中です。これも特許として申請しています。

(3) 金の超微粒子表面の触媒機能発現

金は極めて化学的に安定な物質として知られていますが、粒子径が5nm以下の超微粒子になり酸化チタンの上に担持されると、低温でも高い活性を有する触媒となることが発見されています。このような金の表面物性の著しいサイズ依存性、及び酸化チタンとの接合界面の化学反応性を解明するために、金超微粒子の最表面及び接合界面における精密な原子構造解析を行い、触媒機能発現のメカニズムを探る研究を行っています。

(4) 生体試料の無染色直接観察

生体試料の高分解能電子顕微鏡観察は、試料が電子線の照射に極めて弱く、またわずかなコントラストでしか観察できないため、非常に難しい技術です。現状では染色を行った試料に対して適当な焦点はずれを与えコントラストを得た上で写真撮影が行われますが、次世代超電子顕微鏡では無染色状態のありのままの生物組織をピントをずらすことなく無収差で高分解能観察ができます。しかも実時間で球面収差補正と位相像抽出が行われるため、試料に与える電子線損傷効果を最小限にとどめることが出来ます。現在、細胞の鞭毛組織の解析やウイルスの微細組織の観察を行っています。

4. すでに得られている成果

金の表面原子が電子線照射によって移動する様子をビデオ撮影することに成功しました。その成果を第14回国際電子顕微鏡学会(メキシコ、8月30日～9月4日、1998)において招待講演として発表し、多大の反響を呼びました。一つ一つの原子が表面を移動する様子が明瞭に、無収差像としてとらえられており、表面物性研究の上でも貴重な知見が得られています。興味のある方々には御覧頂けますので御利用下さい。

5. 研究の体制

期間：1996年4月～2001年3月

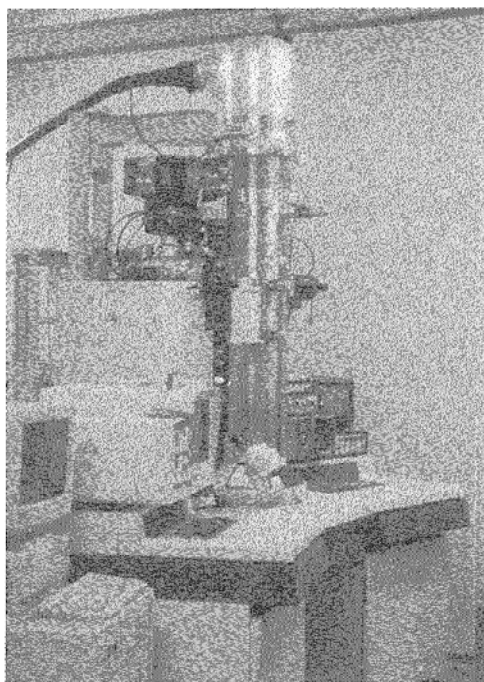
組織：この研究の主拠点は大阪大学大学院工学研究科 志水研究室

現在大学側として志水隆一教授、高井義造助教授、木村吉秀助手、周国富、宇津呂英俊、川崎忠寛、上田友彦の大学院生と生田孝教授(大阪電通大)、企業側としては製作にあっている日立製作所から市橋幹雄、砂子沢成人、佐藤雄司、谷口佳史の諸氏が参企して研究組織を構成しております。

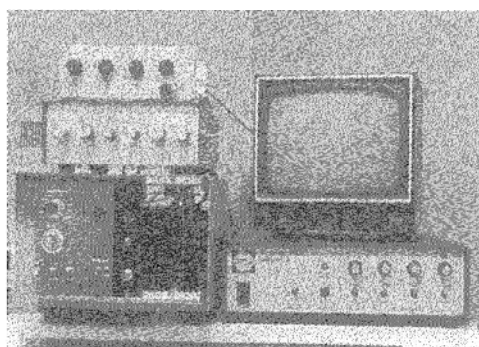
このメンバーは原則として月1回技術検討会を開いて技術的な問題点の解決にとどまらず新しい展開を模索しながら活発な議論を行っています。この議論の中からすでに共同特許も生まれています。

また、海外から Professor R. H. Ritchie (Oak Ridge National Laboratory), Professor T. N. Rhodin (Cornell University), Professor H. J. Kang (Chungbuk National University), Professor Z. J. Ding (University of Science and Technolo-

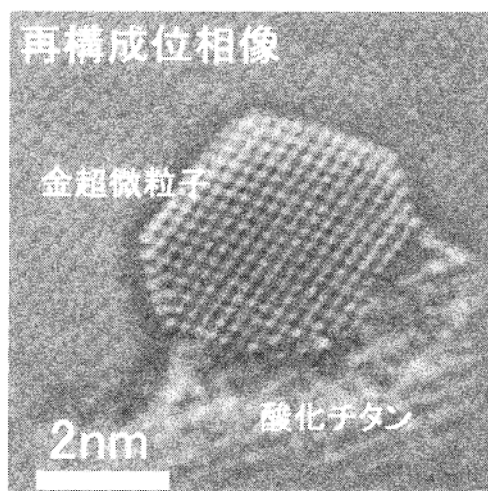
gy of China), Professor H.Rose (Darmstadt Technical University) などのこの分野のエキスパートを1ヶ月招聘して、本プロジェクトの推進に協力してもらっています。



次世代超電子顕微鏡



能動型画像処理システム



収差補正された位相像. 新触媒として期待される酸化チタン(TiO_2)上の金超微粒子.